

EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL MATERIAL PARTICULADO DE LA  
FORMACIÓN CARBONERA 7 PARA EL BLOQUE GARZAS, PECOL ENERGY

DANIEL RICARDO CASALLAS PEDRAZA

LUIS ALFONSO RINCON CAMARGO

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA METALÚRGICA  
TUNJA  
2018

EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL MATERIAL PARTICULADO DE LA  
FORMACIÓN CARBONERA 7 PARA EL BLOQUE GARZAS, PECOL ENERGY

DANIEL RICARDO CASALLAS PEDRAZA

LUIS ALFONSO RINCON CAMARGO

TRABAJO DE GRADO  
PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIEROS METALÚRGICOS

DIRECTORA:  
YANETH PINEDA TRIANA  
DOCTORA EN INGENIERÍA MECÁNICA Y DE MATERIALES

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA METALÚRGICA  
TUNJA  
2018

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

---

Firma director del proyecto

---

Firma jurado

---

Firma jurado

Tunja, 06 de marzo del 2018.

La autoridad científica de la facultad de ingeniería reside en ella misma, por lo tanto, no responde por las opiniones expresadas en este proyecto de grado. “Se autoriza su reproducción indicando necesariamente su origen”.

*Dedicamos esta investigación a nuestros padres y hermanos los cuales nos brindaron todo su apoyo a lo largo de nuestra formación como personas y como profesionales y a todos los compañeros y amigos que estuvieron junto a nosotros en este camino.*

*Agradecemos a la universidad y a nuestros docentes los cuales nos formaron, a  
INCIJEMA por su colaboración en la realización de este proyecto y  
especialmente a los ingenieros Kelly medina, Jazmith Cardenal, Cristian Ruge,  
Miguel Bernal y Alejandro Caldas.*

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	13
INTRODUCCIÓN.....	14
1 OBJETIVOS.....	15
1.1 GENERAL.....	15
1.2 ESPECÍFICOS .....	15
2 MARCO TEÓRICO.....	16
2.1 MARCO CONCEPTUAL .....	16
2.1.1 Caracterización de materiales .....	16
2.1.2 Tribología .....	16
2.1.3 Fricción .....	17
2.1.4 Desgaste .....	20
2.1.5 Norma ASTM G65 para ensayo de chorro con arena seca .....	26
2.1.6 Ensayos no destructivos (END).....	28
2.1.7 Material sólido particulado .....	29
2.1.8 Ensayo de granulometría por tamizado ASTM D-422 .....	29
2.1.9 Acero API 5L .....	30
2.1.10 Formación carbonera .....	32
2.2 ESTADO DEL ARTE.....	34
3 DISEÑO METODOLÓGICO .....	39
3.1 Extracción de material particulado sólido .....	39
3.2 Cuarteo de material sólido particulado seco.....	40
3.3 Lavado y filtrado del material sólido particulado .....	41
3.4 Medición de pH.....	44
3.5 Secado del material particulado .....	45
3.6 Fluorescencia de rayos x (FRX).....	46
3.7 Microscopia electrónica de barrido (MEB).....	47
3.8 Difracción de rayos X (DRX) .....	48
3.9 Granulometría laser.....	49
3.10 Granulometría por tamizado ASTM D-422 .....	50
3.11 ASTM G 65 Chorro con arena seca. ....	51
4 ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	54
4.1 Caracterización química por medio de fluorescencia de rayos x .....	54

<b>4.2</b>	<b>Caracterización morfológica mediante el Microscopio Electrónico de Barrido</b>	<b>55</b>
<b>4.3</b>	<b>Determinación de los compuestos por medio de difracción de rayos x</b>	<b>64</b>
<b>4.4</b>	<b>Tamaño de las partículas por medio de granulometría laser</b>	<b>67</b>
<b>4.5</b>	<b>Tamaño de partículas por tamizado (ASTM D422)</b>	<b>68</b>
<b>4.6</b>	<b>Chorro con arena seca</b>	<b>71</b>
<b>4.7</b>	<b>Topografía de las probetas</b>	<b>73</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>82</b>
<b>6</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>84</b>
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>85</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>88</b>



## TABLA DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1.</b> Superficie de contacto pequeña.....	18
<b>Ilustración 2.</b> Superficie de contacto grande.....	19
<b>Ilustración 3.</b> Desgaste adhesivo entre dos piezas en movimiento. ....	20
<b>Ilustración 4.</b> Desgaste abrasivo debido a la presencia de partículas duras.....	21
<b>Ilustración 5.</b> Desgaste abrasivo, <b>a)</b> Abrasión de dos cuerpos, <b>b)</b> Abrasión de tres cuerpos. ....	22
<b>Ilustración 6.</b> Representación esquemática para el caso del desgaste abrasivo por micro corte y por deformación plástica. ....	23
<b>Ilustración 7.</b> Mecanismos de desgaste abrasivo. ....	23
<b>Ilustración 8.</b> Desgaste por fatiga superficial. ....	25
<b>Ilustración 9.</b> Desgaste erosivo debido a la acción de un fluido con partículas abrasivas en suspensión.....	26
<b>Ilustración 10.</b> Diagrama esquemático de la máquina de prueba. ....	28
<b>Ilustración 11.</b> Columna estratigráfica de la cuenca de los llanos orientales. ....	33
<b>Ilustración 12.</b> Diagrama de flujo del procedimiento de cuarteo del material particulado. ....	40
<b>Ilustración 13.</b> Plancha de agitación para limpieza de material particulado sólido.....	42
<b>Ilustración 14.</b> Procesos del lavado del material particulado. ....	42
<b>Ilustración 15.</b> Vasos con solución agua-material particulado y tomas pH.....	45
<b>Ilustración 16.</b> Peso de material particulado sólido después de secado.....	45
<b>Ilustración 17.</b> Configuración del equipo MINIPAL para ensayo. ....	46
<b>Ilustración 18.</b> Filamento y cámara de vacío donde se trata la muestra. ....	47
<b>Ilustración 19.</b> Preparación de muestra para ensayo de difracción de rayos X. ....	48
<b>Ilustración 20.</b> Equipo de difracción de rayos x.....	49
<b>Ilustración 21.</b> Ensayo de granulometría laser. ....	50
<b>Ilustración 22.</b> Número de tamices. ....	51
<b>Ilustración 23.</b> Funcionamiento del equipo de chorro con arena.....	52
<b>Ilustración 24.</b> Pesos iniciales. ....	53
<b>Ilustración 25.</b> Gráfica de resultados según composición de elementos unitarios. ....	54
<b>Ilustración 26.</b> Morfología de los granos de material sólido particulado a 44 aumentos. .	56
<b>Ilustración 27.</b> Formas de los granos de arenas. ....	57
<b>Ilustración 28.</b> Partícula de material particulado a 160 aumentos.....	58
<b>Ilustración 29.</b> Dimensiones de los granos a 140 aumentos.....	59
<b>Ilustración 30.</b> Tamaño predominante del material sólido particulado. ....	60
<b>Ilustración 31.</b> Grano de material particulado a 1000 aumentos. ....	61
<b>Ilustración 32.</b> Morfología de material particulado sólido a 2000 aumentos.....	63
<b>Ilustración 33.</b> Morfología de material particulado sólido a 5000 aumentos.....	63
<b>Ilustración 34.</b> Gráfica de porcentajes de los compuestos presentados del material particulado sólido. ....	65
<b>Ilustración 35.</b> Densidad y volumen obtenidos del equipo de difracción de rayos x .....	66
<b>Ilustración 36.</b> Parámetros para el ensayo de granulometría laser.....	67

<b>Ilustración 37.</b> Curva de granulometría Vs densidad de volumen.....	68
<b>Ilustración 38.</b> Gráfica de barras, Retenidos en gramos.....	69
<b>Ilustración 39.</b> Gráfica, Retenidos (%) Vs N° Tamiz.....	70
<b>Ilustración 40.</b> Mapa topográfico.....	73
<b>Ilustración 41.</b> Mapa topográfico.....	74
<b>Ilustración 42.</b> Micrografía 500 aumentos.....	75
<b>Ilustración 43.</b> Micrografía 1000 aumentos.....	76
<b>Ilustración 44.</b> Micrografías del acero API 5L x65.....	77
<b>Ilustración 45.</b> Micrografía a 500 aumentos.....	78
<b>Ilustración 46.</b> Micrografía a 1000 aumentos.....	79
<b>Ilustración 47.</b> Micrografía a 2000 aumentos.....	79
<b>Ilustración 48.</b> . Micrografía a 500 aumentos.....	80
<b>Ilustración 49.</b> Micrografía a 1000 aumentos.....	81
<b>Ilustración 50.</b> Micrografía a 2000 aumentos.....	81

## LISTADO DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Serie de tamices empleadas para el ensayo según norma ASTM-422. ....	30
<b>Tabla 2.</b> Composición Química Especificada del Acero API 5L X56 y API 5L X65 .....	31
<b>Tabla 3.</b> Especificación de Requerimientos de Tensión para el Acero API 5L X56 y API 5L X65. ....	31
<b>Tabla 4.</b> Procedimiento de medición del pH a distintas muestras. ....	44
<b>Tabla 5.</b> Pesos iniciales probetas de acero API 5L x65. ....	53
<b>Tabla 6.</b> composición de elementos de fluorescencia de rayos X. ....	54
<b>Tabla 7. Escalas de durezas.</b> .....	62
<b>Tabla 8.</b> Reporte DRX.....	65
<b>Tabla 9.</b> Análisis granulométrico del material sólido particulado. ....	68
<b>Tabla 10.</b> Clasificación de suelos ASTM D 2487.....	71
<b>Tabla 11.</b> Resultados del ensayo de chorro con arena seca ASTM G 65.....	71
<b>Tabla 12.</b> Registro de profundidad.....	72

## LISTA DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Mapeo topográfico probeta número 1.....	88
<b>Anexo 2.</b> Mapeo topográfico probeta número 2.....	90
<b>Anexo 3.</b> Mapeo topográfico probeta número 3.....	92
<b>Anexo 4.</b> Mapeo topográfico probeta número 4.....	94
<b>Anexo 5.</b> Mapeo topográfico probeta número 5.....	96
<b>Anexo 6.</b> Mapeo topográfico probeta número 6.....	98
<b>Anexo 7.</b> Mapeo topográfico probeta número 7.....	100
<b>Anexo 8.</b> Mapeo topográfico probeta número 8.....	102
<b>Anexo 9.</b> Mapeo topográfico probeta número 9.....	104
<b>Anexo 10.</b> Mapeo topográfico probeta número 10.....	106
<b>Anexo 11.</b> Mapeo topográfico probeta número 12.....	108

## RESUMEN

En la realización de este proyecto se obtuvieron muestras del material sólido particulado de la cabeza del pozo y tanques Free Water Knock Out (FWCO), los cuales tuvieron una preparación con un lavado de ultrasonido en varsol para eliminar los productos orgánicos que vienen con el material sólido particulado, esto se realizó para someterlos a diversos ensayos de caracterización química como son:

Tomas de pH, para analizar si las muestras de material sólido particulado, diluidas en agua son acidas o neutras, fluorescencia de rayos X para determinar la composición química de elementos unitarios, difracción de rayos X para determinar la composición química de los elementos compuestos y definir el compuesto predominante en el material sólido particulado,

Ensayos físicos como son: microscopia electrónica de barrido para establecer la morfología que posee los granos en la muestra. Análisis de tamaño de partícula de suelos bajo norma ASTM D422 para definir granulometría y ensayo de chorro de arena seca bajo norma ASTM G65 para observar el efecto del material sólido particulado sobre una muestra de la tubería API 5L x 56. Con estos ensayos se obtendrán resultados específicos para determinar la variable del porqué el material sólido particulado que transita dentro de los oleoductos del bloque GARZAS procedente de la formación carbonera 7 afecta la integridad de la tubería.

**Palabras clave:** Morfología, fluorescencia de rayos x, difracción de rayos x, granulometría, abrasión, hidrocarburos.

## INTRODUCCIÓN

El transporte de hidrocarburos en la industria petrolera representa más de la mitad de los costos de operación de estas compañías (53%), por tanto, es un factor muy importante en esta industria. Uno de los medios de transporte son los oleoductos los cuales son un conjunto de tubería que van desde el punto de producción hasta su almacenaje o desembarque.

Uno de los inconvenientes del transporte del hidrocarburo, es el mecanismo de falla que ocurre en sus líneas de flujo debido al material sólido particulado que fluye a través de la tubería, generando daños internos en su estructura lo que podría provocar algún tipo de falla.

Este evento ocasiona un impacto negativo, porque provoca una gran afectación tanto económica como ambiental, por lo cual, es conveniente una debida planeación de mantenimiento y control de las líneas de flujo por medio de las normas y técnicas aplicadas para este caso.

El estudio del material sólido particulado dará un primer paso para evaluar y analizar los perjuicios provocados por éste y ayudará en la implementación de un método para reducir el daño en la integridad de la tubería.

En este trabajo fue necesario para su análisis, muestras procedentes del bloque Garzas ubicado a 150 Km del municipio de Yopal en la vía al municipio de Orocué, departamento del Casanare donde se encuentra la estación Salmón (SLM), de la empresa PECOL ENERGY COMPANY.

## **1 OBJETIVOS**

### **1.1 GENERAL**

Evaluar el efecto del material particulado en suspensión en el transporte de hidrocarburos, en líneas de transferencia de las locaciones Guajaro (GJR), Chacar (CHR), Orosal (OSL) y Oroc (ORC) hacia la locación Salmon (SLM) operadas por la empresa PECOL ENERGY COMPANY.

### **1.2 ESPECÍFICOS**

- 1.2.1** Caracterizar químicamente el material particulado sólido en suspensión mediante fluorescencia de rayos X.
- 1.2.2** Evaluar la morfología predominante en muestras de sólidos en cabeza de pozo y tanque free water knock out (Free Water Knock Out, FWCO) mediante microscopía electrónica de barrido.
- 1.2.3** Identificar tamaño de partículas a través de la técnica de preparación mecánica por tamices mediante la teoría, retenidos vs acumulados ASTM D 422.
- 1.2.4** Elaborar un procedimiento escrito para el análisis de muestras sólidas en campo aplicando la normativa ASTM D 422.
- 1.2.5** Evaluar el efecto de los compuestos encontrados en la caracterización química.
- 1.2.6** Medición de pH del material particulado sólido en suspensión en disolución de agua.

## **2 MARCO TEÓRICO**

### **2.1 MARCO CONCEPTUAL**

El marco referencial que fundamenta esta investigación proporcionara al lector una idea más clara acerca de ese tema. Se encontrarán los conceptos básicos, complementarios y específicos. Para la caracterización química y físicas del material sólido particulado.

#### **2.1.1 Caracterización de materiales**

Consiste en la obtención de información acerca de un material bajo estudio (composición, estructura, topología, topografía, morfología, propiedades en general) a partir de la interacción de una señal (eléctrica, luminosa, térmica, etc.) con una porción de dicho material. Por tanto, toda caracterización de un material supone una agresión al mismo, es decir, una perturbación del mismo. El estudio de la respuesta del material a dicha perturbación nos permite conocer las propiedades o más concretamente, las peculiaridades del mismo. A veces se suele confundir el término caracterización con el de análisis. Toda caracterización implica realizar un análisis del material, sin embargo, no todo análisis implica realizar una caracterización<sup>1</sup>. Por ejemplo, el seguimiento de un proceso de degradación empleando alguna técnica o método instrumental no implica conocer alguna característica intrínseca del material, sino que nos permite saber cómo éste se comporta ante determinadas circunstancias. Precisamente son las características de dicho material las que condicionan dicho comportamiento.

#### **2.1.2 Tribología**

La tribología es la ciencia que estudia el rozamiento de dos o más superficies que se encuentran en contacto y a su vez en movimiento relativo, incluyendo también

---

<sup>1</sup> MARISOL FARALDOS Y CONSUELO GOBERNA (eds.), Técnicas de análisis y caracterización de Materiales, 2.a ed. rev. y aum. CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS. MADRID, 2011.



todos los fenómenos que se relacionan con este<sup>2</sup>. La importancia de este estudio conlleva a la mejora de muchos problemas existentes debido al bajo interés y muchas veces ignorancia que se tiene sobre el tema. Problemas en los ámbitos de confiabilidad, mantenimiento, reparaciones, entre otros aspectos son los que se podría evitar si se tiene presente la aplicación de la tribología y por consiguiente generar un beneficio económico. En la tribología intervienen tres fenómenos los cuales están muy interrelacionados entre sí, los cuales son: la fricción, el desgaste y la lubricación<sup>3</sup>. La fricción que aparece cuando se tienen dos o más cuerpos en movimiento y por supuesto contacto entre ellos, el desgaste el cual aparece o es un efecto de la fricción y la lubricación como el medio de evitar el desgaste.

### 2.1.3 Fricción

La fricción es la fuerza que se opone al movimiento de una superficie sobre otra y a su vez ésta se deriva en fuerza de fricción cinética y fuerza de fricción estática. La primera es aquella donde existe un movimiento continuo, mientras que la segunda es aquella que se opone al inicio del movimiento, es decir, cuando el cuerpo se encuentra en reposo<sup>4</sup>.

Cuando dos cuerpos están en reposo, estos tienden a crear enlaces entre sí o microsoldaduras en las superficies de contacto, por lo cual se supone que la fuerza de fricción estática es mayor que la dinámica. Todas las superficies, hasta la más pulida presentan rugosidades a escala microscópica<sup>5</sup>. Las rugosidades se ven a escala microscópica como picos y valles. Al estar en contacto las dos piezas, la superficie real de contacto es la existente entre los picos de ambas, por lo tanto, al aumentar la presión de una sobre otra estos picos tienden a deformarse o aplastarse aumentando así la superficie de contacto.

---

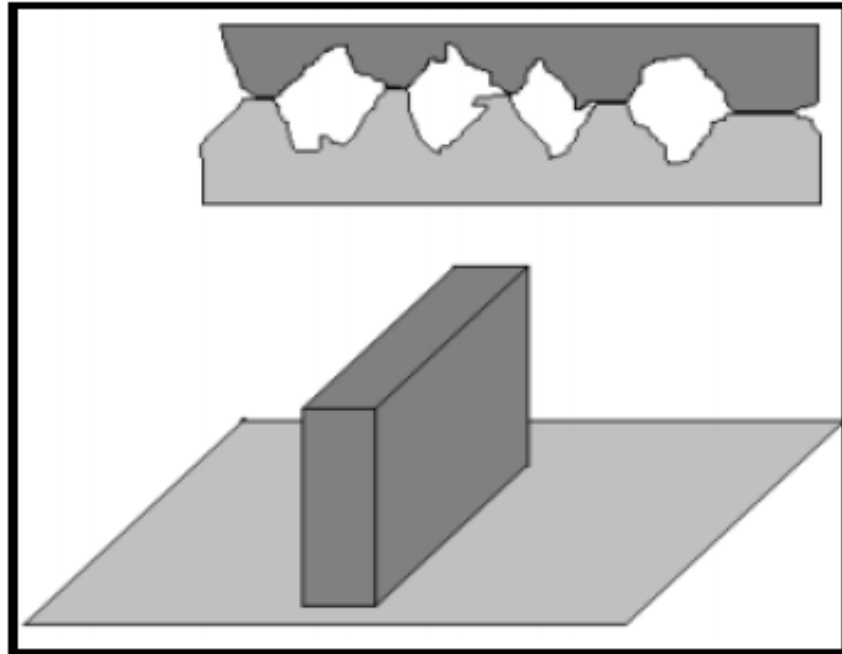
<sup>2</sup> AGUILAR SÁNCHEZ, JOSÉ RUBÉN. (2009). Tribology. Atlantic International University: Tesis de Doctorado.

<sup>3</sup> M. EN I. FELIPE DÍAZ DEL CASTILLO RODRÍGUEZ. Tribología: Fricción, Desgaste y Lubricación. Cuautitlán Izcalli, 2007. Lectura de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Departamento de Ingeniería.

<sup>4</sup> M. EN I. FELIPE DÍAZ DEL CASTILLO RODRÍGUEZ. Tribología: Fricción, Desgaste y Lubricación. Cuautitlán Izcalli, 2007. Lectura de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Departamento de Ingeniería. pag. 7-10.

<sup>5</sup> RABINOWICZ, E. (1995). Friction and wear of materials. USA: John Wiley.

**Ilustración 1.** Superficie de contacto pequeña.

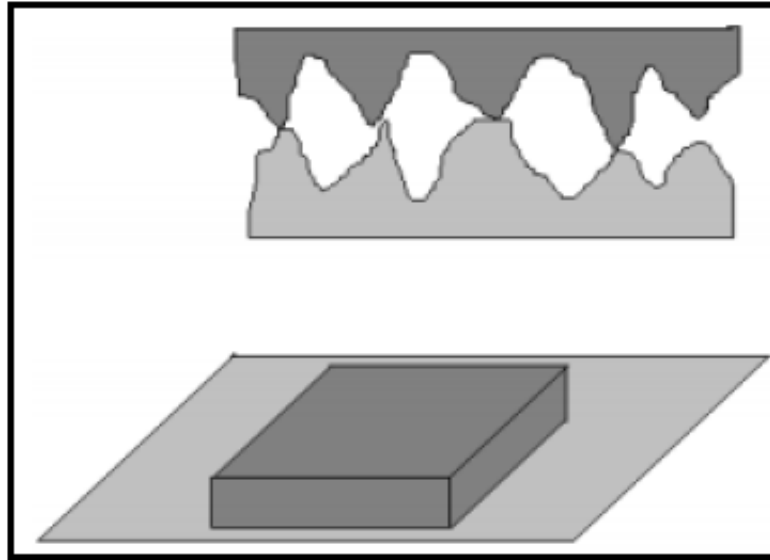


**Fuente:** M. EN I. FELIPE DÍAZ DEL CASTILLO RODRÍGUEZ. Tribología: Fricción, Desgaste y Lubricación. Cuautitlán Izcalli, 2007.

Las microsoldaduras que aparecen, deben romperse para permitir el deslizamiento de las dos superficies. Estas micro soldaduras son las que se dan por la incrustación de los picos de una superficie en los valles de otra originando la fricción estática.

Cuando se tiene una superficie de contacto pequeña, aparecen grandes deformaciones en los picos mostrados microscópicamente, mientras que, en superficies de contacto grandes, estos picos son más pequeños, debido a que la presión disminuye como se puede observar en las ilustraciones 1 y 2.

**Ilustración 2.** Superficie de contacto grande.



**Fuente:** M. EN I. FELIPE DÍAZ DEL CASTILLO RODRÍGUEZ. Tribología: Fricción, Desgaste y Lubricación. Cuautitlán Izcalli, 2007.

Las leyes de rozamiento para cuerpos sólido son

- a) La fuerza de rozamiento es de igual dirección y sentido contrario al movimiento del cuerpo.
- b) La fuerza de rozamiento es prácticamente independiente del área de la superficie de contacto.
- c) La fuerza de rozamiento depende de la naturaleza de los cuerpos en contacto, así como del estado en que se encuentren sus superficies.
- d) La fuerza de rozamiento es directamente proporcional a la fuerza normal que actúa entre las superficies de contacto.
- e) Para un mismo par de cuerpos, el rozamiento es mayor en el momento de arranque que cuando se inicia el movimiento.
- f) La fuerza de rozamiento es prácticamente independiente de la velocidad con que se desplaza un cuerpo sobre otro.

## 2.1.4 Desgaste

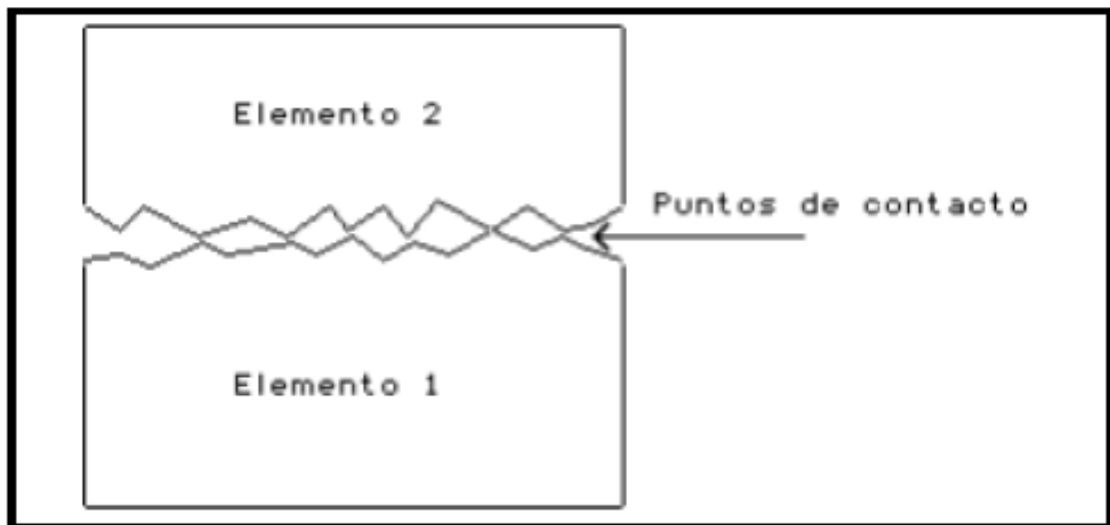
El desgaste puede definirse como la pérdida de material de dos o más cuerpos cuando estos se encuentran en contacto y movimiento relativo bajo la acción de una fuerza<sup>6</sup>.

A continuación, se mostrará los principales tipos de desgaste:

### 2.1.4.1 Desgaste adhesivo

Ocurre cuando dos superficies se deslizan una contra otra bajo presión.

**Ilustración 3.** Desgaste adhesivo entre dos piezas en movimiento.



**Fuente:** CHAVEZ MARTINEZ, FRANCISCO (2002). La tribología: Ciencia y Técnica para el Mantenimiento.

En los puntos de contacto de las superficies involucradas, ocurre un desprendimiento de material en el momento en que comienza el deslizamiento, pues este rompe la unión o la microsoldaduras existente en el momento (Ilustración 3).

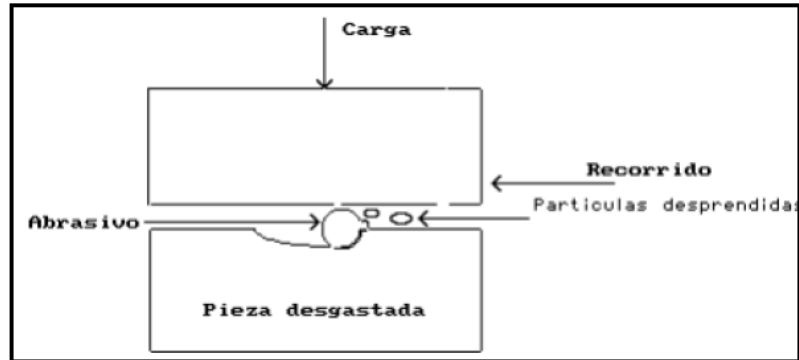
---

<sup>6</sup> CHAVEZ MARTINEZ, FRANCISCO (2002). La tribología: Ciencia y Técnica para el Mantenimiento. México: Ed. Noriega Limusa 2da reimpresión.

#### 2.1.4.2 Desgaste abrasivo

Es la remoción del material debido a partículas o superficies duras presentes en medio de dos piezas que se encuentren en movimiento relativo y que sus superficies se encuentren en contacto (Ilustración 4). Este tipo de desgaste puede ocurrir en estado seco o en estado húmedo.

**Ilustración 4.** Desgaste abrasivo debido a la presencia de partículas duras.



**Fuente:** CHAVEZ MARTINEZ, FRANCISCO (2002). La tribología: Ciencia y Técnica para el Mantenimiento.

La Norma ASTM G40-92 define el desgaste abrasivo como la pérdida de masa resultante de la interacción entre partículas o asperezas duras que son forzadas contra una superficie y se mueven a lo largo de ella<sup>7</sup>.

Existen dos tipos de desgaste abrasivo: desgaste abrasivo de dos cuerpos y desgaste abrasivo de tres cuerpos (Ilustración 5).

El desgaste abrasivo de dos cuerpos es aquel causado por asperezas o rugosidades de una de las superficies en contacto, mientras que el desgaste abrasivo de tres cuerpos es provocado por partículas duras que se encuentran sueltas en medio de los dos cuerpos que se encuentran en movimiento relativo.

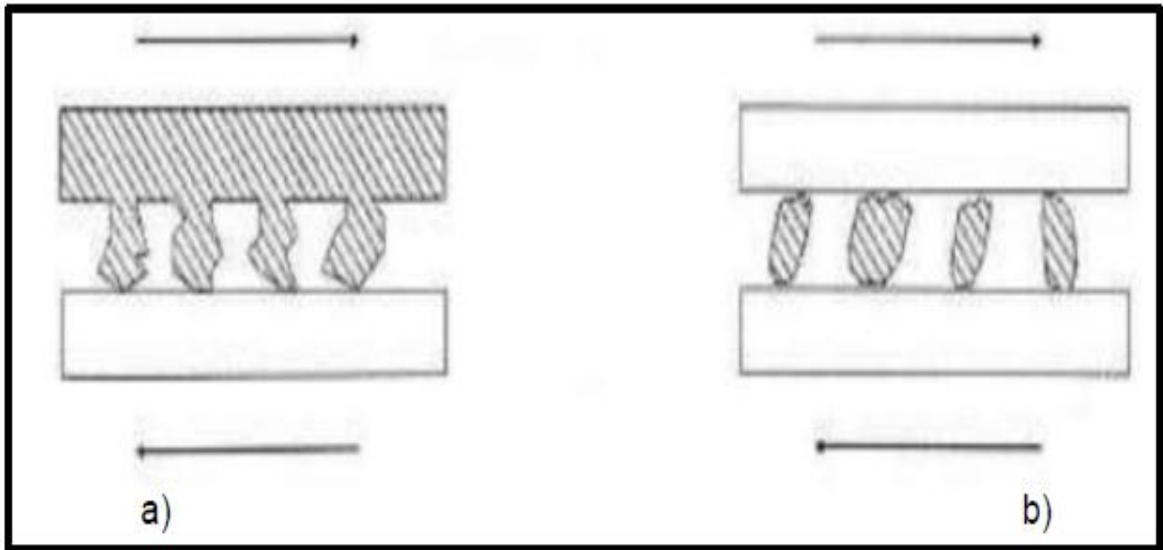
Por ejemplo, el desgaste abrasivo a dos cuerpos, tenemos el pulido de una muestra mediante el uso de lijas, o un taladro perforando un material.

Se puede mencionar también como ejemplo de desgaste abrasivo a tres cuerpos el sufrido por las mandíbulas de una trituradora al quebrar roca, o la existencia de partículas contaminantes en un aceite lubricante de superficies en contacto deslizante.

---

<sup>7</sup> ASTM G40-92 "Standard Terminology Relating to Wear and Erosion"

**Ilustración 5.** Desgaste abrasivo, **a)** Abrasión de dos cuerpos, **b)** Abrasión de tres cuerpos.



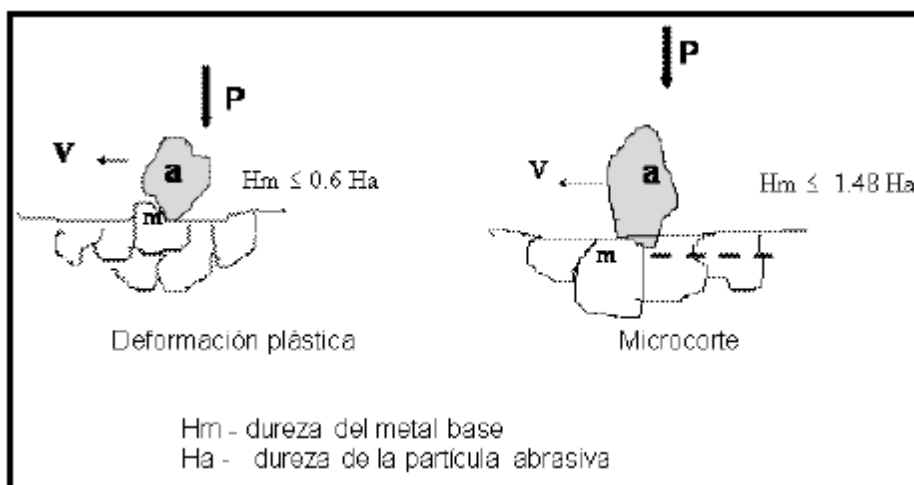
**Fuente:** CHAVEZ MARTINEZ, FRANCISCO (2002). La tribología: Ciencia y Técnica para el Mantenimiento.

El desgaste abrasivo depende de la cantidad de partículas abrasivas presentes en la zona de fricción, y se manifiesta por la destrucción de la superficie en forma de deformación plástica, microrrayaduras y microcortes.

La separación de partículas se da cuando las irregularidades del material más duro se incrustan en el más blando debido al movimiento existente entre estos, también al ocasionar surcos en el material blando, este tiende a desprender material en forma de partículas el cual va a ocasionar también desgaste abrasivo.

Dependiendo de la dureza de las partículas abrasivas ( $H_m$ ), aparecerán dos diferentes casos de desgaste abrasivo, deformación plástica y microcorte (Ilustración 6).

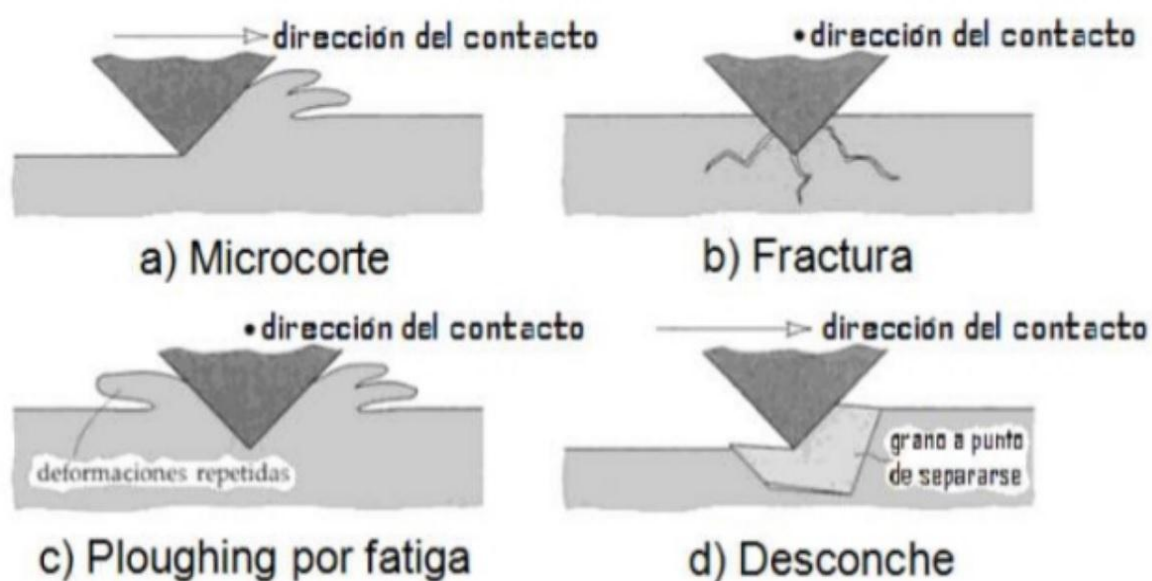
**Ilustración 6.** Representación esquemática para el caso del desgaste abrasivo por micro corte y por deformación plástica.



**Fuente:** HUTCHINGS, I.M. (1992). Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. UK: Edward Arnold.

En la siguiente ilustración, se observa como en la pérdida de material pueden intervenir cuatro mecanismos de desgaste:

**Ilustración 7.** Mecanismos de desgaste abrasivo.



**Fuente:** HUTCHINGS, I.M. (1992). Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. UK: Edward Arnold.

#### **2.1.4.3 Desgaste abrasivo por microcorte.**

El primer mecanismo (Ilustración 7a), representa el microcorte clásico, donde una punta aguda o una aspereza de alta dureza corta a otra superficie de menor dureza y el material de la superficie desgastada es sacado mediante partículas.

#### **2.1.4.4 Desgaste abrasivo por fractura**

En el segundo mecanismo (Ilustración 7b), cuando el material desgastado es frágil, puede aparecer la fractura en la superficie de contacto; por consiguiente, las partículas desgastadas son el resultado de la unión de distintas micro grietas.

#### **2.1.4.5 Desgaste abrasivo por fatiga**

Cuando un material dúctil es desgastado, no aparece microcorte, pero la superficie desgastada es deformada repetidamente, en este caso las partículas son el resultado del desgaste por fatiga. Tercer mecanismo (Ilustración 7c).

#### **2.1.4.6 Desgaste abrasivo por desconche**

El ultimo mecanismo (Ilustración 7d) representa el desgaste por desconche, presentado principalmente en cerámicas.

##### **2.1.4.6.1 Clasificación del desgaste abrasivo**

- **Desgaste abrasivo de baja presión:**

Es aquel en el que las partículas se mueven libremente por la superficie y las tensiones que actúan en esta son bajas.

- **Desgaste abrasivo de alta presión:**

Ocurre cuando las partículas abrasivas son atrapadas entre dos superficies las cuales están actuando con carga y el desgaste ocurre por penetración, por fractura de las partes móviles y por deformación plástica de la matriz.

- **Desgaste abrasivo con impacto:**

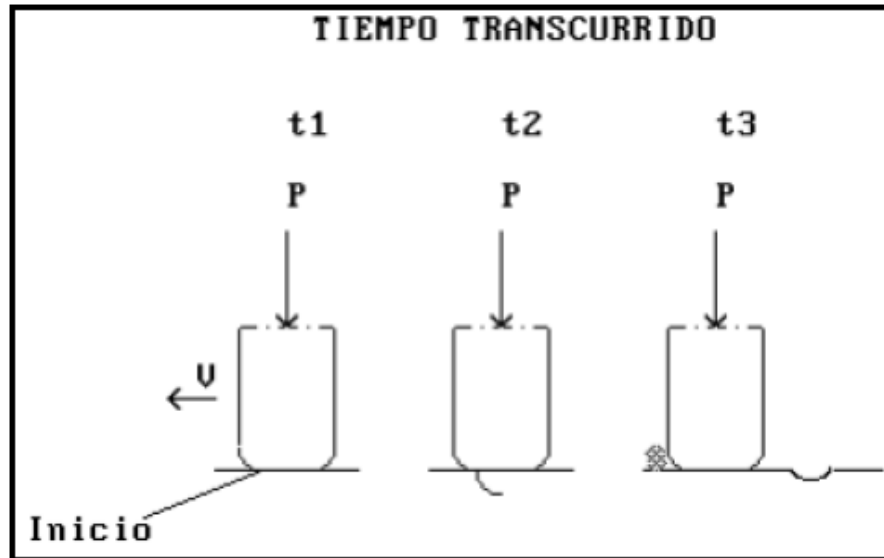
Involucra la remoción de material por la acción de un abrasivo cuyas partículas son de un tamaño apreciable e impacta a la superficie bajo un ángulo determinado. En este, el abrasivo produce grandes surcos y ralladuras que se ven a simple vista.



- **Desgaste por fatiga superficial:**

Es la falla de contactos lubricados tales como rodamientos, engranes, levas, entre otros. La pérdida de material es por desprendimiento de superficiales y por picaduras, como en los engranes. Se piensa que las grietas por fatiga aparecen debajo de la superficie en un punto en que el esfuerzo cortante es máximo (Ilustración 8)<sup>8</sup>.

**Ilustración 8.** Desgaste por fatiga superficial.



**Fuente:** CHAVEZ MARTINEZ, FRANCISCO (2002). La tribología: Ciencia y Técnica para el Mantenimiento.

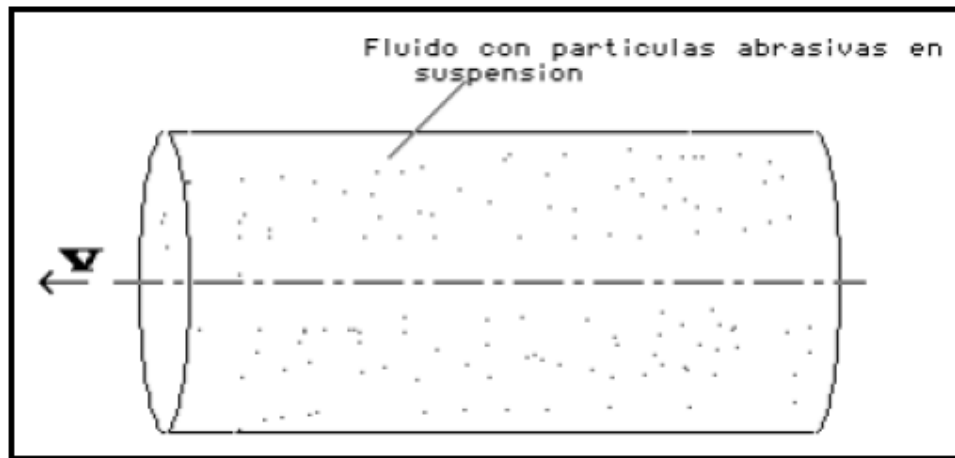
#### 2.1.4.7 Desgaste erosivo

En este desgaste la pérdida de material es ocasionada por un líquido que contiene partículas abrasivas y el cual se encuentra en movimiento relativo con el material (Ilustración 9). Existen dos tipos de desgaste erosivo: erosión abrasiva, que se caracteriza por que el movimiento relativo de las partículas es paralelo con las superficies, y erosión bajo impacto, en la cual el movimiento de las partículas es perpendicular a la superficie<sup>9</sup>.

<sup>8</sup> HUTCHINGS, I.M. (1992). Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. UK: Edward Arnold.

<sup>9</sup> R.G. WELLMAN, AND C. ALLEN, Wear 186-187, 117-122 (1995).

**Ilustración 9.** Desgaste erosivo debido a la acción de un fluido con partículas abrasivas en suspensión.



**Fuente:** CHAVEZ MARTINEZ, FRANCISCO (2002). La tribología: Ciencia y Técnica para el Mantenimiento.

#### **2.1.4.8 Desgaste corrosivo**

En esta forma de desgaste la pérdida del material ocurre cuando se remueve la superficie la cual ha reaccionado químicamente con el medio ambiente<sup>10</sup>.

La tribología estudia en los materiales los efectos de la fricción, desgaste y lubricación que tienen lugar durante el contacto de dos superficies sólidas en movimiento, las cuales son analizadas por medio de técnicas de inspección como los ensayos no destructivos.

#### **2.1.5 Norma ASTM G65 para ensayo de chorro con arena seca**

Esta norma abarca todo lo relacionado a la realización de la práctica de desgaste abrasivo a tres cuerpos (material de estudio, arena y rueda de goma). A continuación, se resumen los aspectos principales:

---

<sup>10</sup> RABINOWICZ, E. (1995). Friction and wear of materials. USA: John Wiley.

- Alcance:

Cubre los procedimientos para determinar la resistencia del material frente a desgaste abrasivo los cuales nos arrojaran unos datos frente a este fenómeno los cuales se reproducirán y se tomaran bajo unas condiciones específicas.

Los resultados de estas pruebas serán en milímetros cúbicos de material perdido, cuanto más resistente sea el material a la abrasión menos será su pérdida volumétrica.

A continuación, se mencionarán 4 procedimientos los cuales son recomendados para determinados grados de resistencia al desgaste o espesor del material de ensayo:

**Procedimiento A:** Es una prueba relativamente severa la cual clasifica los materiales en una amplia escala de pérdida de volumen desde baja a extrema resistencia a la abrasión. Es comúnmente usada para materiales de media a alta resistencia a la abrasión con un rango de pérdida de volumen calificado de 36 a 65 mm<sup>3</sup>

**Procedimiento B:** Esta puede ser usada para materiales con alta resistencia a la abrasión, pero es más usada en materiales de media y baja resistencia abrasiva. Es usado cuando la pérdida de volumen desarrollada por el procedimiento A supera los 100 milímetros cúbicos.

**Procedimiento C:** Particularmente usado en capas delgadas.

**Procedimiento D:** Útil en materiales de baja resistencia a la abrasión.

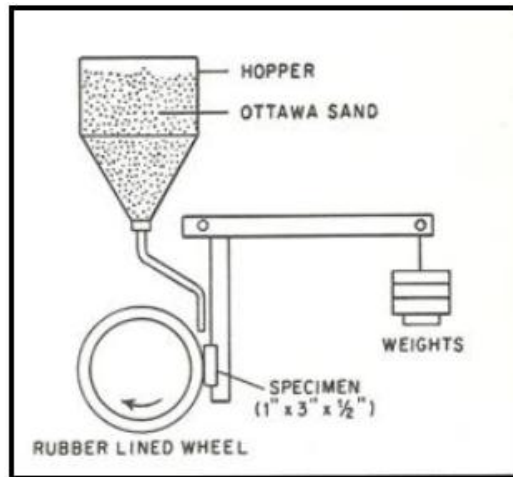
- Descripción de la máquina

De acuerdo a la norma ASTM G-65, el equipo utilizado para las pruebas de desgaste abrasivo consta principalmente de una tolva y una boquilla para el paso de la arena seca, una rueda de acero recubierta con caucho vulcanizado, una palanca para control de la carga, un porta-probeta, un motor, un contador de revoluciones y un sistema de control. Entre el disco y la probeta se mantiene un flujo laminar y constante de abrasivo (arena) a través de la boquilla que deja pasar las partículas. El abrasivo es presionado por medio de la palanca con una fuerza constante y definida. La dirección de rotación del disco tendrá el mismo sentido que el flujo de arena (Ilustración 10) <sup>11</sup>.

---

<sup>11</sup> ASTM G65, Standard Practice for Conducting Dry Sand/Rubber Wheel Abrasion Test.

**Ilustración 10.**Diagrama esquemático de la máquina de prueba.



**Fuente:** ASTM G65, Standard Practice for Conducting Dry Sand/Rubber Wheel Abrasion Test.

El desgaste abrasivo generado puede ser clasificado como arado y rodadura. En el primer caso de desgaste las partículas de arena se embeben en el caucho y aran la superficie ensayada; mientras que en la rodadura las partículas de arena simultáneamente ruedan y deslizan entre el caucho y la superficie ensayada, los bordes irregulares de la arena ejercen elevada presión sobre la muestra causando indentación, deformación plástica y desprendimiento de material.

Estos dos fenómenos son principalmente gobernados por la velocidad, la fuerza de contacto entre la rueda y la muestra, así como la dureza relativa de estos dos. Con fuerza reducida y/o bajas durezas en la muestra se genera rodadura debido a que el caucho no se deforma lo suficiente como para embeber las partículas de arena, estas ruedan y se deslizan entre las dos superficies.

### 2.1.6 Ensayos no destructivos (END)

Son la aplicación de métodos físicos indirectos, como es la transmisión del sonido, la opacidad al paso de la radiación, etc., y que tienen la finalidad de verificar la sanidad de las piezas examinadas. No obstante, cuando se aplica este tipo de pruebas no se busca determinar las propiedades físicas inherentes de la pieza, sino verificar su homogeneidad y continuidad. Por lo tanto, estas pruebas no sustituyen a los ensayos destructivos, sino que más bien los complementa<sup>12</sup>.

---

<sup>12</sup> AMERICAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING, Recommended practice No. SNT-TC- 1A. Personal qualification and certification in nondestructive testing. Ed. Aug. 84, USA, columbus Oh., 1984.

Los ensayos no destructivos, como su nombre lo indica, no alteran de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales de un material. Por ello no inutilizan las piezas que son sometidas a los ensayos y tampoco afectan de forma permanente las propiedades de los materiales que las componen.

### **2.1.7 Material sólido particulado**

Impureza común presente en los fluidos, elemento de frecuente aparición en la extracción del crudo, de efecto abrasivo<sup>13</sup>.

Su impacto es evidente cuando se trabaja con presiones y velocidades altas, provocando erosión en la estructura de la tubería por la que se transporta el hidrocarburo.

#### **Clasificación ASTM D 2487 de partículas según su tamaño en mm<sup>14</sup>.**

Gravas: %retenido en tamiz N° 4, diámetro mayor a 4.75mm.

Arenas: partículas con diámetros entre los 0.075mm y 4.75mm.

Finos: partículas con diámetros inferiores a 0.075mm.

La norma ASTM D 2487 sirve para calificar muestras de material sólido particulado que se encuentran en distintas áreas de trabajo, generalmente como son construcción, minería y pozos petroleros, en esta última área los sólidos particulados causa daños al momento de su transporte en las tuberías de acero.

### **2.1.8 Ensayo de granulometría por tamizado ASTM D-422**

La norma describe el método para determinar los porcentajes de suelo que pasan por los distintos tamices de la serie empleada en el ensayo, hasta la malla de 0.075 mm (N° 200)<sup>15</sup>.

---

<sup>13</sup> CHRISTOPHER EARLS BRENNEN. "Fundamentals of multiphase flow" Primera edición. Cambridge Universitypress. Cambridge, 2005.

<sup>14</sup> ASTM D 2487, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)

<sup>15</sup> ASTM D422 - 63(2007) e2 "Standard Test Method for Particle-Size Analysis".

**Tabla 1.** Serie de tamices empleadas para el ensayo según norma ASTM-422.

Tamiz	Abertura del tamiz (mm)
3"	76.2
2 ½"	63.5
2"	50.8
1 ½"	38.1
1"	25.4
¾ "	19.1
½ "	12.7
3/8 "	9.52
¼ "	6.35
No. 4	4.76
No. 10	2.00
No. 40	0.420
No. 200	0.075

El análisis granulométrico tiene por objeto la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo.

Según sean las características de los materiales finos de la muestra, el análisis con tamices se hace, bien con la muestra entera, o bien con parte de ella después de separar los finos por lavado. Si la necesidad del lavado no se puede determinar por examen visual, se seca en el horno una pequeña porción húmeda del material y luego se examina su resistencia en seco rompiéndola entre los dedos. Si se puede romper fácilmente y el material fino se pulveriza bajo la presión de aquellos, entonces el análisis con tamices, se puede efectuar sin previo lavado.

### 2.1.9 Acero API 5L

Los aceros API 5L se clasifican en dos tipos los PSL 1 y PSL 2 estas designaciones definen los niveles diferentes de requisitos técnicos usuales. Cada tipo tiene requisitos obligatorios. Cuando se indica sólo PSL, los requisitos aplican para ambos<sup>16</sup>.

Existen diferentes grados estándar de aceros A25, A, B, X42, X46, X56, X60, X70 Y X80; y cualquier grado intermedio. PSL 1 tuberías que pueden ser suministradas en los grados de A25 hasta X70. PSL 2 tuberías que pueden ser suministradas en los grados B hasta X80. Las tuberías PSL 1 pueden medir de 0.405 hasta 80 pulgadas de diámetro y las PSL 2 de 4½ hasta 80 pulgadas.

---

<sup>16</sup> SPECIFICATION FOR LINE PIPE, API Specification 5L Forty-Second, january 2000, pp. 37, 38.

El tratamiento térmico para estos aceros se debe realizar de acuerdo al procedimiento documentado en la especificación API 5L y pueden ser normalizados y templados, relevados de esfuerzos, y endurecimiento por envejecido.

La composición química del acero usado para la manufactura debe contener como mínimo: carbono, magnesio, fósforo, azufre, cromo, cobre, molibdeno, níquel, silicio, titanio, vanadio y cualquier otro elemento de aleación. Las propiedades mecánicas deben ajustarse a los requerimientos de tensión de la Especificación API 5L de acuerdo a cada tipo y grado de acero.

La tabla 2 muestra la composición química especificada y la tabla 3 las propiedades mecánicas del acero API 5LX56 y el API 5L X65.

**Tabla 2.** Composición Química Especificada del Acero API 5L X56 y API 5L X65

Grado	Carbono máximo	Magnesio máximo	Fosforo máximo	Azufre máximo	Silicio máximo	Otros
X56	0.28	1.40	0.030	0.030	0.40	c, d
X65	0.26	1.45	0.040	0.050	0.40	c, d

c: A menos que sea acordado de otra forma, la suma de los contenidos de niobio y vanadio debe ser  $\leq 0.06\%$ .

d: La suma de los concentrados de niobio, vanadio y titanio debe ser  $\leq 0.15\%$ .

**Tabla 3.** Especificación de Requerimientos de Tensión para el Acero API 5L X56 y API 5L X65.

Grado	Fluencia mínima	Resistencia a la tensión mínima	Porcentaje mínimo de elongación en 2 plg. (50.8 mm)

	psi	MPa	psi	MPa	a
X56	56600	390	71100	490	
X65	65300	450	77600	535	

a= Elongación mínima en 2 pulgadas (50.8mm) determinada por la ecuación:

$$e = 1,944 \frac{A^{0.2}}{U^{0.9}}$$

e = Elongación mínima en 2 pulgadas (50.8 mm) en porcentaje redondeado.

A= Área de la probeta de la prueba de tensión aplicable.

U= Esfuerzo último a la tensión mínimo especificado.

### 2.1.10 Formación carbonera

La Formación Carbonera es considerada de origen no marino, pero contiene algunas capas de origen marino, y está descrita en su sección tipo como una intercalación de arcillas grises a gris verdoso y pardas con areniscas y con algunos lechos de lignito en su parte inferior y superior; las areniscas se presentan en capas cuyo espesor varía desde menos de 1 m hasta 30 m, el tamaño del grano es variable con matriz arcillosa<sup>17</sup>.

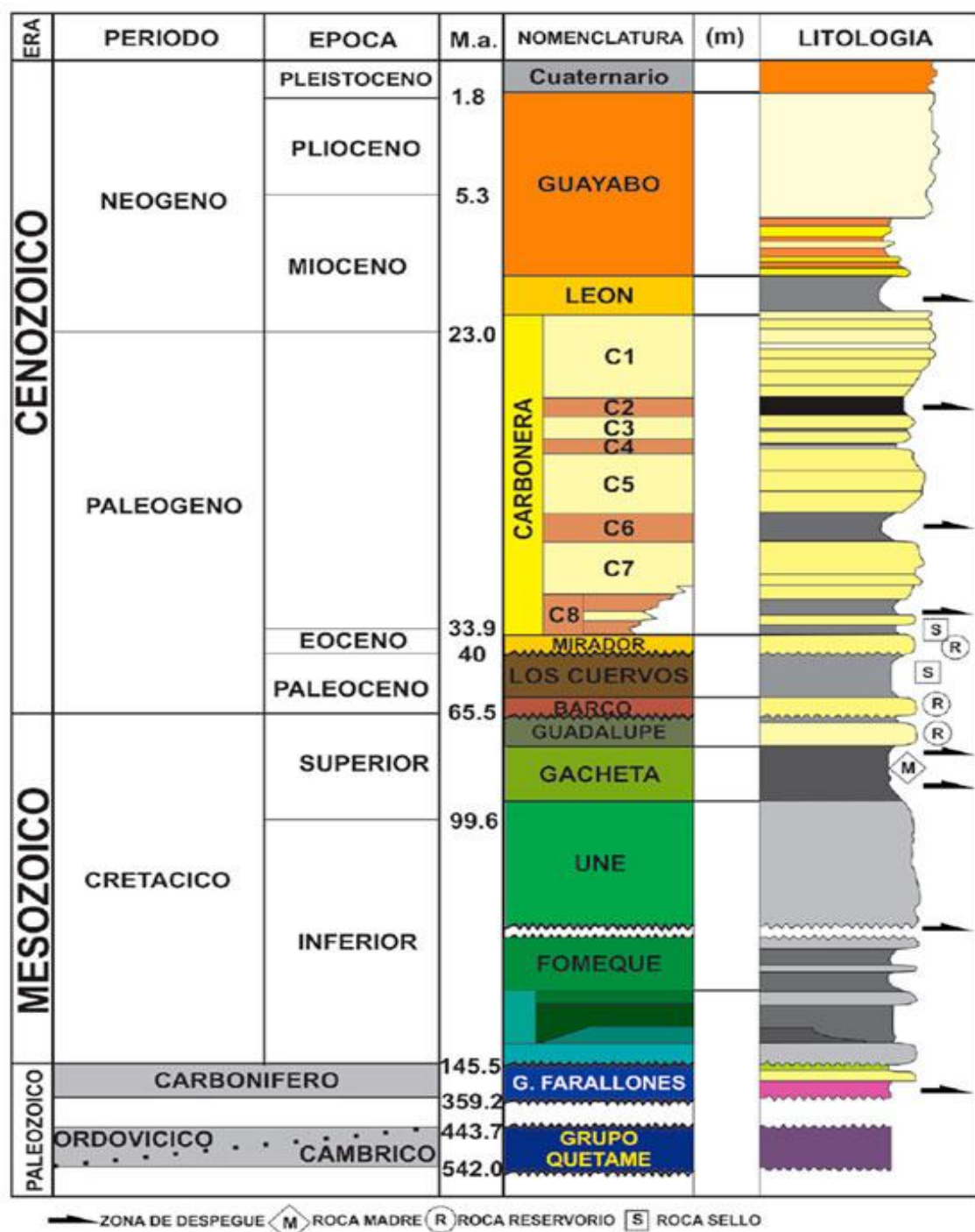
Para el área del Casanare la formación carbonera se ha dividido en ocho conjuntos litológicos (Miembros), los conjuntos designados con números impares (C1, C3, C5, C7) son predominantemente arenosos y los enumerados como pares (C2, C4, C6 y C8) son predominantemente arcillosos y lutíticos que fueron depositados en un ambiente continental a marino somero.

---

<sup>17</sup> ARANGO, ANDREA. Análisis Sismoestratigráfico de la Formación Carbonera Miembro C7. Magister en Ciencias – Geología. Bogotá, Colombia, 2014.



**Ilustración 11.**Columna estratigráfica de la cuenca de los llanos orientales.



**Fuente:** Modificación de Acevedo y Hernández, 2004.

## 2.2 ESTADO DEL ARTE

Arango D, A. (2014). Describe la estratigrafía secuencial de los depósitos asociados al Miembro C7 de la Formación Carbonera, en la zona centro oriental de la Cuenca de los Llanos Orientales de Colombia, El análisis de este miembro C7 de la formación carbonera hace parte fundamental de la teoría para el conocimiento del origen del material sólido particulado que se va a analizar en este proyecto. Arango obtuvo como resultado un modelo de la distribución espacio-temporal de los ambientes y depósitos asociados, contribuyendo al entendimiento de éstos en el área de estudio y definiendo que el material predominante es arenoso<sup>18</sup>.

Para el sistema de evaluación de erosión corrosión se puede realizar mediante la técnica de pérdida de peso como lo realizó Y. Yang, YF Cheng (2012). Los cuales investigaron los efectos paramétricos, incluyendo la concentración de arena, la velocidad de flujo de la suspensión y el ángulo de impacto, sobre la erosión-corrosión (E-C) de acero X65 en la suspensión de arenas de petrolíferas de 200 µm utilizando un sistema de bucle de impacto por prueba de pérdida de peso según el ángulo de impacto utilizado, medidas de la curva de polarización y caracterización de la superficie. Se encontró que los componentes de erosión, incluyendo la erosión pura y la erosión por corrosión, son los principales contribuyentes a E-C del acero, mientras que la contribución de componentes de corrosión es leve. Con el aumento de la concentración de arena de un 25 % de concentración en peso y la velocidad de flujo de la suspensión, la velocidad de E-C del acero aumenta<sup>19</sup> encontrándose una pérdida de 0.47 (mg/cm<sup>2</sup> h). Bajo estos resultados se realizó la prueba de impacto de chorro de arena bajo norma ASTM G 65 ya que se cuenta con el equipo y los resultados son similares de cantidad de arena y pérdidas de peso.

En base a la pérdida de material de nuestro ensayo el cual solo consta de una variable fija, ya que a manera de estudio no se incluirá más componentes con el material sólido particulado, así que se tomó como referencia la investigación de X. Tang, LY Xu, YF Cheng (2008). Para observar la erosión-corrosión (E-C) del acero de tubería X-65 en una suspensión de aceite-arena simulada a través de un sistema

---

<sup>18</sup> ARANGO, ANDREA. Análisis Sismoestratigráfico de la Formación Carbonera Miembro C7. Magister en Ciencias – Geología. Bogotá, Colombia, 2014.

<sup>19</sup> Y. YANG, YF CHENG, desgaste, Volúmenes 276 - 277, 15 de febrero de 2012, Efectos paramétricos sobre la tasa de erosión-corrosión y el mecanismo de los tubos de acero al carbono en la lechada de arenas oleaginosas, Páginas 141-148.

de chorros de impacto con un tamaño de partícula de 600  $\mu\text{m}$ . Donde se realizaron mediciones de pérdida de peso de 0.71 mg con una mezcla de aceite-arena, curvas de polarización potencio dinámica y espectroscopia de impedancia electroquímica combinadas con observación de microscopía óptica para determinar la sinergia de la corrosión y erosión en E-C de acero. Se encontró que la pasividad del acero desarrollado en una emulsión estática de aceite-agua no puede mantenerse en el fluido que fluye debido a la mayor actividad del acero tras el impacto de la emulsión / suspensión<sup>20</sup> y en base a esto poder diferenciar los resultados obtenidos.

Noelmar Pereira, Abbade Sergio João Crnkovic (2000). Se analizó la erosión del acero de la tubería API 5L X65, cuya microestructura consistió en ferrita y martensita obtenida por extinción de la temperatura crítica (770 °C). Se utilizaron ensayos de choque de chorros con suspensión de arena-agua. Los cambios en las propiedades mecánicas, causados por el tratamiento térmico realizado, no indujeron cambios ni en el mecanismo ni en la resistencia a la erosión. La tasa de erosión aumentó con el ángulo de ataque hasta 30° y luego disminuyó hasta 90° con una pérdida de volumen de 41 mm<sup>3</sup>. La microtextura de las superficies erosionadas, en ángulos de ataque de 30° y 90°, era similares para ambas condiciones y estaban compuestas de cráteres y plaquetas en varias etapas de evolución<sup>21</sup>. Y en base a esto poder diferenciar los resultados obtenidos.

Gracias a la investigación de Amir Mansouri (2015). El cual realizó un procedimiento semi-empírico para predecir las tasas de erosión en las geometrías de tuberías, tales como codos y camisas, se pudo establecer la afectación causada por el material sólido particulado en estas zonas. El procedimiento se puede utilizar para estimar las condiciones de funcionamiento seguras y velocidades en la producción de petróleo y gas, donde está presente arena. En el procedimiento propuesto, un concepto que se introduce, permite la determinación de la velocidad de erosión para diferentes geometrías de tubo. Un modelo simplificado de rastreo de partículas se desarrolla y se utiliza para calcular la velocidad de impacto de partículas de arena que se mueven en la región de estancamiento cerca de la pared de la tubería. Se obtuvieron las “regiones de estancamiento equivalentes” de un codo y una camisa

---

<sup>20</sup> X. TANG, LY XU, YF CHENG, Ciencia de la corrosión, Volumen 50, Número 5, mayo de 2008, Comportamiento de corrosión electroquímica del acero X - 65 en la suspensión de arena de aceite simulado, Páginas 1469-1474.

<sup>21</sup> NOELMAR PEREIRA, ABBADE SERGIO JOÃO CRNKOVIC, Tribología Internacional, Volumen 33, Número 12, diciembre de 2000, arena – agua en suspensión erosión de API 5L X65 tubería de acero como se inactivó desde temperatura crítica, Páginas 811-816.

de la geometría de diferentes tamaños a partir de datos experimentales para diámetros de tubo pequeños, y un modelo de cálculo se utilizó para ampliar el procedimiento para diámetros de tubo grandes<sup>22</sup>.

En relación con la investigación anterior la referencia se toma con el mismo propósito de hacer un análisis de estas zonas estudiadas por Kai Wang, Xiufeng Li, Yueshe Wang, Renyang He (2017). En el cual este estudio, se establece un modelo matemático para predecir la erosión de las partículas sólidas en los codos de los oleoductos, en la que se tiene en cuenta la interacción partícula-fluido. Los efectos de la orientación de la curva y las propiedades de las partículas en el proceso de erosión se investigan en detalle. Con el fin de comprender el mecanismo de erosión relacionado con el comportamiento dinámico del fluido de flujo y las partículas arrastradas, la relación entre los flujos secundarios y las trayectorias de partículas se analiza enfáticamente. Los resultados indican que la erosión ocurre principalmente en las regiones cercanas a la salida del codo, especialmente las paredes laterales de la tubería recta aguas abajo y el diámetro interno de la sección doblada. Sin embargo, la erosión en las paredes laterales no siempre puede suceder cuando el efecto de los flujos secundarios no es notable<sup>23</sup>.

M.M. Stack G.H. Abdulrahman (2012). En este estudio se investigó el comportamiento de erosión-corrosión del acero al carbono en petróleo crudo, agua de reservorio y una mezcla de ambas soluciones en un rango de potenciales aplicados, velocidades y ángulo de impacto. La aplicación de este trabajo es a las condiciones de los campos de petróleo aguas arriba y aguas abajo, donde las proporciones de hidrocarburos y agua pueden variar durante el proceso de extracción en el tiempo. Después de la exposición del acero al carbono en el petróleo crudo, el grado de erosión fue mayor que el de la corrosión, mientras que, en el agua del reservorio, las contribuciones de erosión y corrosión fueron similares. Se propusieron regímenes de erosión-corrosión basados en la variación en el comportamiento de erosión en diversos ángulos de impacto y potenciales

---

<sup>22</sup> AMIR MANSOURI, desgaste, Volúmenes 338 - 339, 15 de septiembre de 2015, Mejora del modelado CFD y validación de daños por erosión debidos a partículas de arena fina, Páginas 339-350.

<sup>23</sup> KAI WANG, XIUFENG LI, YUESHE WANG, RENYANG HE, Tecnología del polvo, Volumen 314, 1 de junio de 2017, Investigación numérica del comportamiento de erosión en los codos de oleoductos, Páginas 490-499.

aplicados en los ambientes estudiados<sup>24</sup>. Podemos definir mediante una comparación por los ángulos de impacto cuanto varia la erosión corrosión. Como información complementaria, esta investigación también nos da información cuando el ensayo posee una variable más como es el transporte de material sólido particulado con crudo.

R. Hamzah D.J. Stephenson J.E. Strutt (1995). Desarrollaron un programa experimental para estudiar la interacción entre la erosión y la corrosión en condiciones típicas de producción de petróleo. Un acero C-Mn ha sido expuesto a ambientes que simulan condiciones de CO<sub>2</sub> húmedas y secas. La erosión se ha simulado mediante la introducción de partículas de arena (50-300 µm) y se ha investigado la influencia del ángulo de impacto, la velocidad, la carga de partículas y la temperatura. Los resultados demostraron que para los aceros C-Mn existe una interacción significativa entre la erosión y la corrosión con la tasa de pérdida de metal de corrosión pura a erosión / corrosión aumentando en 2 órdenes de magnitud. El uso de CO<sub>2</sub> húmedo aumenta la tasa de pérdida de metal por un factor de 2-4. Se ha demostrado que la tasa de recesión de metal a baja velocidad está dominada por la formación y eliminación de productos de corrosión superficial<sup>25</sup>.

M.M. Stack, G. Abdulrahman, (2010). Los mapas de erosión-corrosión proporcionan un medio de identificación entre los regímenes de erosión-corrosión en función de los parámetros de erosión y corrosión. Sin embargo, no se ha realizado ningún trabajo para cartografiar los efectos de los parámetros en suspensiones de aceite / agua. Este trabajo investiga el efecto de la erosión-corrosión en el acero al carbono en la producción de campos de petróleo y mapea los resultados con una pérdida de volumen de 8.5 mg cm<sup>2</sup> con partículas de tamaños de 600 a 710 micras. Distinciones entre el comportamiento de erosión-corrosión "sinérgico" y "aditivo" se superponen en los mapas en los diversos entornos<sup>26</sup>.

---

<sup>24</sup> M.M. STACK G.H. ABDULRAHMAN, desgaste, Volúmenes 274 - 275, 27 de enero de 2012, Mapeo de la erosión - corrosión del acero al carbono en soluciones de petróleo - agua: Efectos de la velocidad y del potencial aplicado, Páginas 401-413.

<sup>25</sup> R. HAMZAH, D.J. STEPHENSON, J.E. Strutt, Erosion of material used in petroleum production, Wear, 186 (187) (1995), pp. 493–496.

<sup>26</sup> M.M. STACK, G. ABDULRAHMAN, Mapping erosion–corrosion of carbon steel in oil exploration conditions: some new approaches to characterizing mechanisms and Synergies, Tribol. Int., 43 (7) (2010), pp. 1268–1277.

Mazdak Parsi, Kamyar Najmi (2014). La arena se produce comúnmente junto con fluidos de producción (petróleo y gas), y este es un problema importante para la industria del petróleo y el gas. La producción de arena es una preocupación, ya que puede traer una variedad de problemas. Entre ellos, destacan tres problemas: la caída de presión, el bloqueo de las tuberías y la erosión. Este último es un proceso mecánico complejo en el cual el material se retira de la tubería debido a impactos repetidos de partículas de arena. Como resultado, la tubería puede ser erosionada. Las tuberías erosionadas pueden causar fallas, lo que puede ocasionar pérdidas financieras y problemas ambientales. Por lo tanto, es importante saber qué parámetros regulan el fenómeno de la erosión y cómo se puede modelar<sup>27</sup>.

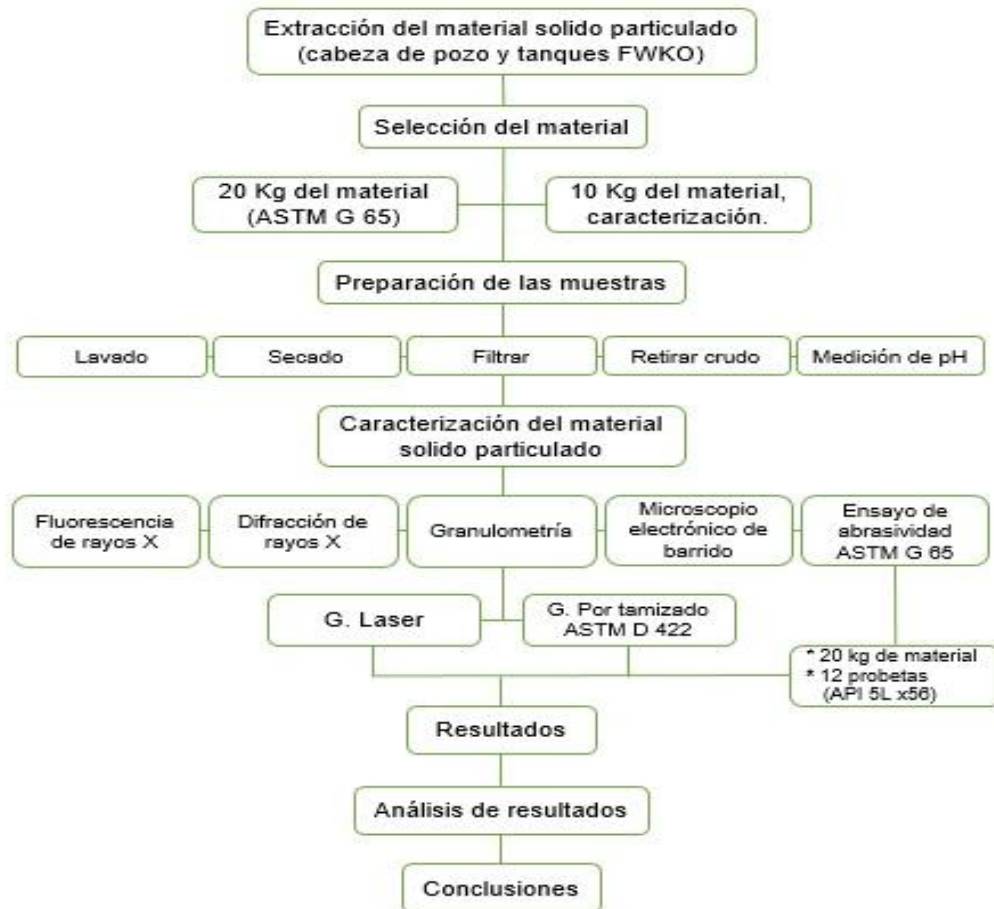
---

<sup>27</sup> MAZDAK PARSI, KAMYAR NAJMI, Diario de Ciencia e Ingeniería de Gas Natural, Volumen 21, noviembre de 2014, Una revisión integral del modelado de la erosión de partículas sólidas para pozos de petróleo y gas y aplicaciones de tuberías, Páginas 850-873.

### 3 DISEÑO METODOLÓGICO

El desarrollo de este proyecto se llevó acabo de la siguiente manera:

#### Procedimiento experimental



#### 3.1 Extracción de material particulado sólido

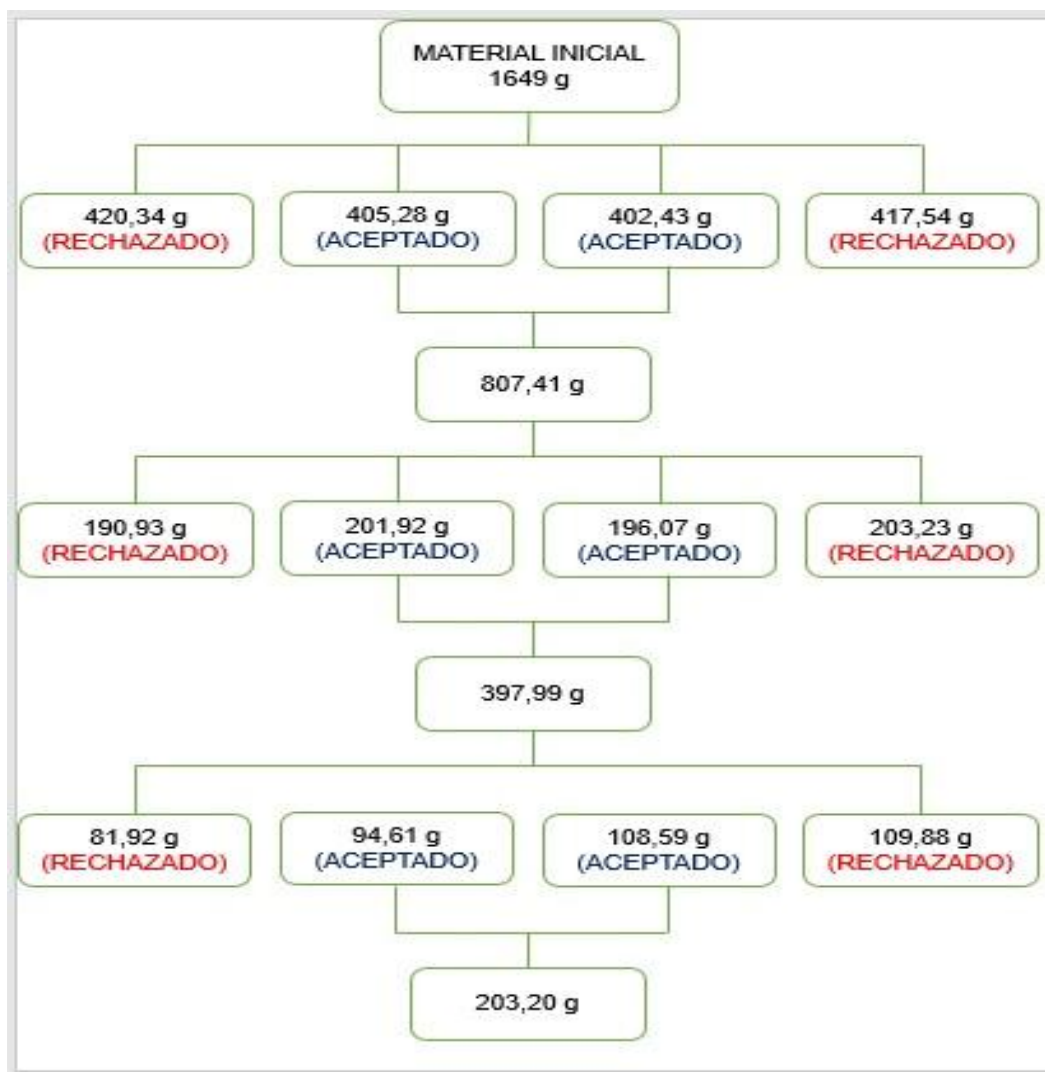
El material particulado sólido se extrae del bloque Garzas ubicado a 150 Km del municipio de Yopal en la vía al municipio de Orocué, departamento del Casanare donde se encuentra la estación Salmón (SLM), de la empresa PECOL ENERGY COMPANY.

La extracción se efectúa en las válvulas de cabeza de pozo y de los tanques Free Water Knock Out (FWKO), recogiendo 20 kg para el ensayo de chorro con arena seca según norma ASTM G65 y otros 10 kg para someterlos a ensayos posteriores.

### 3.2 Cuarteo de material sólido particulado seco

El material obtenido del secado fue en total 1650 gramos el cual fue sometido a cuarteo para ensayos posteriores, con el fin de obtener al final 200 gramos de material particulado sólido<sup>28</sup> como se observa el diagrama de flujo de la Ilustración 12.

**Ilustración 12.**Diagrama de flujo del procedimiento de cuarteo del material particulado.



**Fuente:** Autor.

<sup>28</sup> I.N.V. E – 104 – 07, Procedimientos para la preparación de muestras de suelos por cuarteo.



### 3.3 Lavado y filtrado del material sólido particulado

Se realiza la limpieza del material sólido particulado para la remoción del crudo y materiales orgánicos que puedan estar presentes en la muestra, con el fin de que no se alteren los resultados de los ensayos de caracterización, este procedimiento se realizó por gravimetría ya que no existe un procedimiento bajo norma estándar para el lavado y separación de las muestras extraídas en campo.

El lavado del material sólido particulado se realiza con varsol en un vaso de 1000 ml se agregan porciones de arena de 200 g en 500 ml de varsol y se agita manualmente para disolver el crudo y componentes orgánicos que estas poseen.

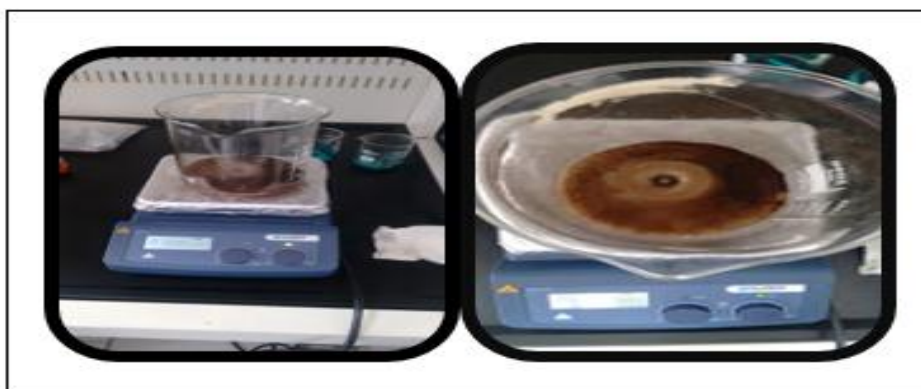
Se introduce el vaso con varsol y el material sólido particulado en el equipo de ultrasonido **3510 Branson** durante una hora con una frecuencia de 60 MHz, seguido a esto se deja sedimentar unos minutos y se realiza un filtrado por medio de pipeteador y el remanente se limpia con paño oleofílico que solo absorbe los líquidos a base de hidrocarburos y no hace contacto con los sólidos.

Para el material sólido particulado se realizó el procedimiento de agitación en una plancha a 38 grados Celsius y 700 revoluciones por minuto en un vaso con un contenido de varsol y el material sólido particulado (Ilustración 13), se debe tener en cuenta que el imán que se introdujo no movía la cantidad de arena de 200 gramos, solo funcionaba si la cantidad de arena se reducía a menos de 100 gramos haciendo que el proceso de limpieza fuera más prolongado.

Finalmente se repite el proceso hasta limpiar 1600 gramos de material particulado sólido, ilustración 14 (procesos del lavado del material particulado).

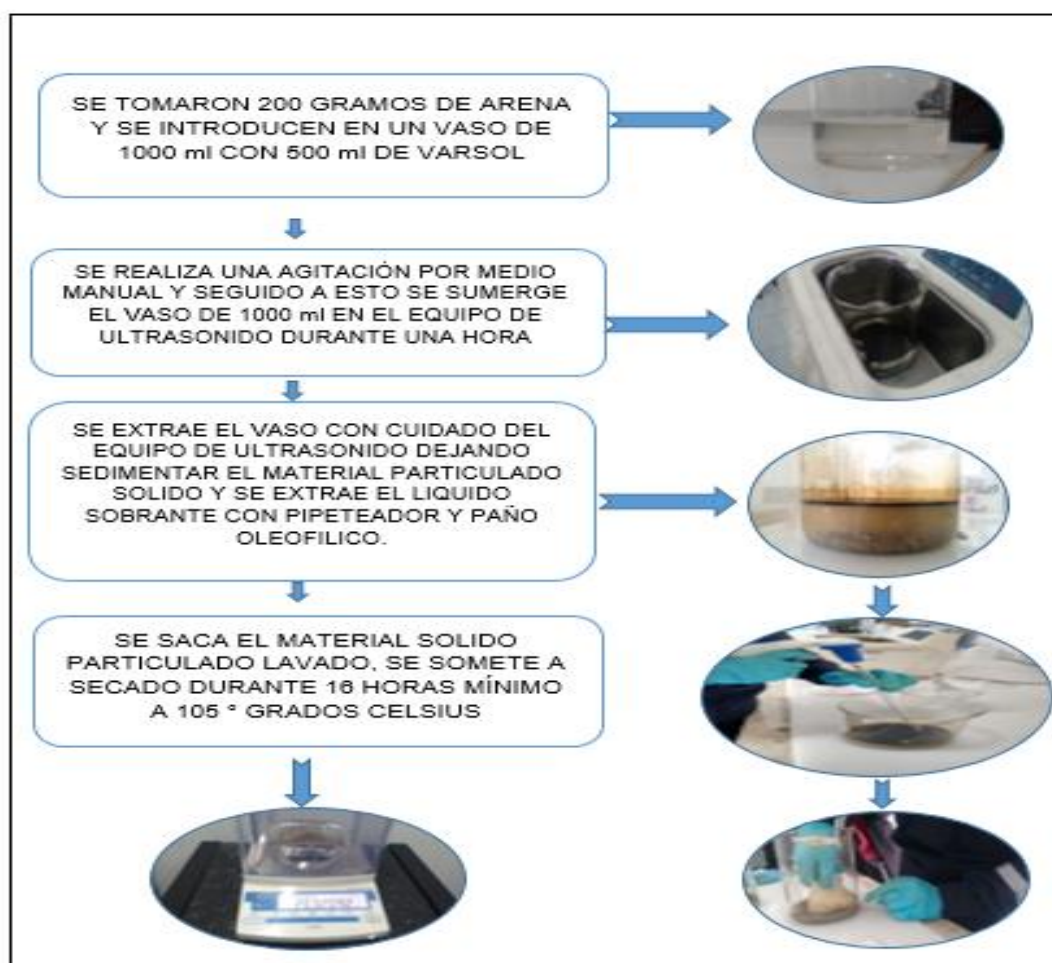
De los procedimientos enunciados podemos apreciar que de la limpieza por ultrasonido y la de plancha con agitación es recomendable realizar el procedimiento de limpieza con el ultrasonido ya que el procedimiento maneja mayor cantidad de muestra a tratar y lo realiza en menos tiempo.

**Ilustración 13.** Plancha de agitación para limpieza de material particulado sólido.



**Fuente:** Autor.

**Ilustración 14.** Procesos del lavado del material particulado.



**Fuente:** Autor.

## Lavado y secado del material sólido particulado

El siguiente procedimiento fue desarrollado para el lavado y secado de las muestras del material en el laboratorio y ajustado para adecuarlo a la empresa Pecol Energy.

- Procedimiento escrito para análisis de muestras sólidas en campo aplicando la normativa ASTM D 422<sup>29</sup>, para determinar la granulometría predominante aportada por los pozos se debe aplicar el siguiente procedimiento:
  - 1) Drenar de la válvula de la línea o del tanque Free Water Knock Out (FWKO) un volumen no superior a un galón en un balde y deje sedimentar por 20 y 30 minutos.
  - 2) Por sedimentación extraiga lo más que pueda de líquido dejando solo los sólidos dentro del balde.
  - 3) En el laboratorio deposite pequeñas cantidades del material sólido (250 gr aproximadamente) en un recipiente con 500 ml de varsol y/o thinner y agite la mezcla para la remoción del aceite del material sólido particulado. Si desea puede calentar el recipiente a una temperatura entre 20 a 50 °C para su mayor separación.
  - 4) Enjuagar y agitar la solución y repita varias veces con el varsol y/o thinner hasta obtener el material sólido lo más limpio posible, retire el varsol y/o thinner con crudo, puede ayudarse con un paño oleofilico.
  - 5) Secar las muestras en un horno o mufla a una temperatura de 105 °C ± 5° según norma NTC 14-59 y ASTM 22-16. Repita el proceso hasta obtener una muestra de 500 gr aproximadamente.
  - 6) Proceder a tamizar los 500 gr del material sólido particulado en los tamices 4, 8, 16, 30, 50, 80, 100, 150, 200. Según norma ASTM D 422, por un tiempo inferior a 10 minutos.
  - 7) Pesarse el retenido de material sólido de cada tamiz y registre los datos en la siguiente tabla:

N° tamiz	Retenidos (gr)	Porcentaje retenidos (%)

- 8) Realizar en un papel milimetrado o en Excel una gráfica del porcentaje de retenidos Vs el N° de tamiz.
- 9) Determinar el porcentaje de partículas predominantes en la muestra y regístrelo para su posterior estudio.

<sup>29</sup> ASTM D422 - 63(2007) e2 "Standard Test Method for Particle-Size Analysis".

### 3.4 Medición de pH

El ensayo se realiza con el fin de determinar la variación del pH de la muestra antes y después de retirar el crudo para observar si existe alguna diferencia considerable que pueda interactuar directa o indirectamente en el fenómeno de erosión - corrosión de la tubería.

Para el procedimiento de toma de pH a las muestras solidas se realizó bajo norma ASTM D4972 – 13.

La toma de los dos (2) pH se realiza midiendo:

La disolución de agua destilada-arena lavada y otra agua destilada-arena sin lavar, la descripción del procedimiento que se lleva acabo para la muestra es el observado en la tabla 4 y la ilustración 15.

**Tabla 4.** Procedimiento de medición del pH a distintas muestras.

Medición de pH del material sólido particulado <b>con crudo.</b>	Medición de pH del material sólido particulado <b>después de limpieza y lavado.</b>
<p>Se deposita 5 g del material particulado sólido con <b>crudo</b> en 20 ml de agua destilada dejándola sedimentar.</p> <p>Se filtra el <b>crudo</b> con el material sólido particulado y se transvasa esta agua a un vaso de 50 ml.</p> <p>Después se introduce el pH-metro <b>HANNA</b> en el vaso, previamente calibrado con una solución de agua destilada propia del equipo.</p> <p>Se toman los datos de pH del agua donde se encontraba el material sólido particulado con crudo.</p> <p>pH obtenido: 7.72</p>	<p>Se deposita 5g del material sólido particulado en 20 ml de agua destilada dejándola sedimentar.</p> <p>Se filtra el material particulado sólido y se transvasa esta agua a un vaso de 50 ml.</p> <p>Después se introduce el pH-metro <b>HANNA</b> en el vaso. previamente calibrado con una solución de agua destilada propia del equipo.</p> <p>Se toman los datos de pH del agua donde se encontraba el material particulado.</p> <p>pH obtenido: 7.58</p>

**Fuente:** Autor.

**Ilustración 15.** Vasos con solución agua-material particulado y tomas pH.

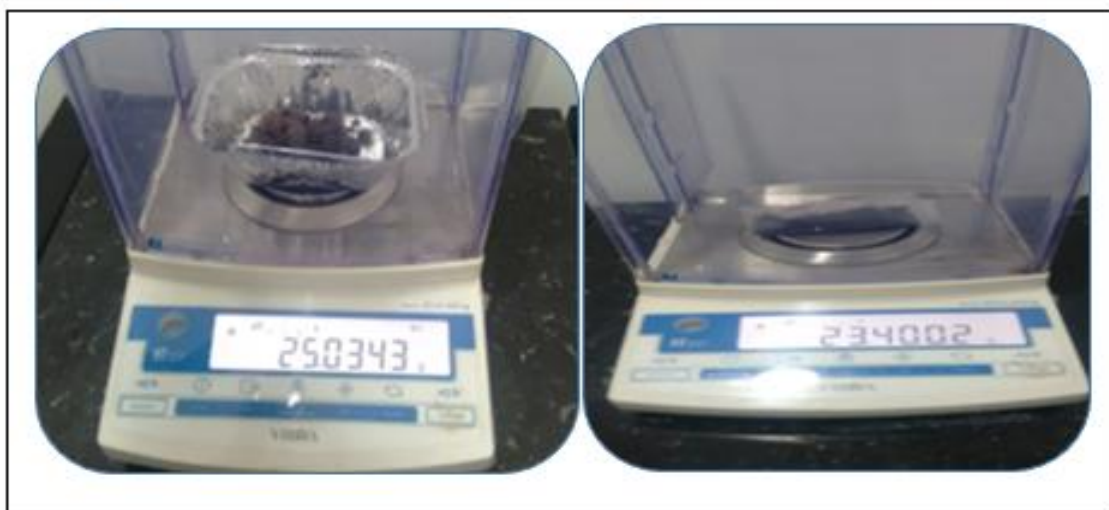


**Fuente:** Autor.

### 3.5 Secado del material particulado

Se sometieron 25 gr de material particulado como muestra para obtener el valor de su porcentaje de humedad por el agua y componentes adicionales con los que inicialmente viene del pozo, para esto se pesó inicialmente el material a introducirse en el horno **BINDER** a 105° Celsius durante 16 horas según norma NTC 1459 y ASTM 2216. Seguido a esto se retira del horno y se pesa el seco, en la balanza **VIBRA** con una resolución de 0,0001 gramos a una temperatura ambiente de 17°C, se hace la diferencia de pesos y se obtiene el porcentaje de humedad que poseía el material sólido particulado observado en la Ilustración 16.

**Ilustración 16.** Peso de material particulado sólido después de secado.



**Fuente:** Autor.

## Caracterización química del material

### 3.6 Fluorescencia de rayos x (FRX)

Para obtener una composición elemental se realiza este ensayo, donde se lleva una muestra de material sólido particulado de 2 gramos y se introduce dentro del equipo de fluorescencia de rayos X **MINIPAL 2**.

La muestra fue preparada con apisonamiento por ser en polvo, se arma en dos frascos de teflón, uno interna y otro externo, cada uno con un bisel que se hace coincidir y en medio papel proleno, se unen los frascos y en medio queda el papel, luego se vierte la muestra y se apisona con un apisonador de bronce para introducirse en el equipo.

Para este ensayo el equipo fue programado en modo standarless ya que no se contaba con un patrón para silicio.

A una energía de 20 KV y 0,007 mA con un tiempo de 240 segundos, en un medio de Helio-aire como se muestra en la Ilustración 17, para obtener los porcentajes de los elementos en la muestra.

**Ilustración 17.** Configuración del equipo MINIPAL para ensayo.



**Fuente:** Autor.

### 3.7 Microscopia electrónica de barrido (MEB)

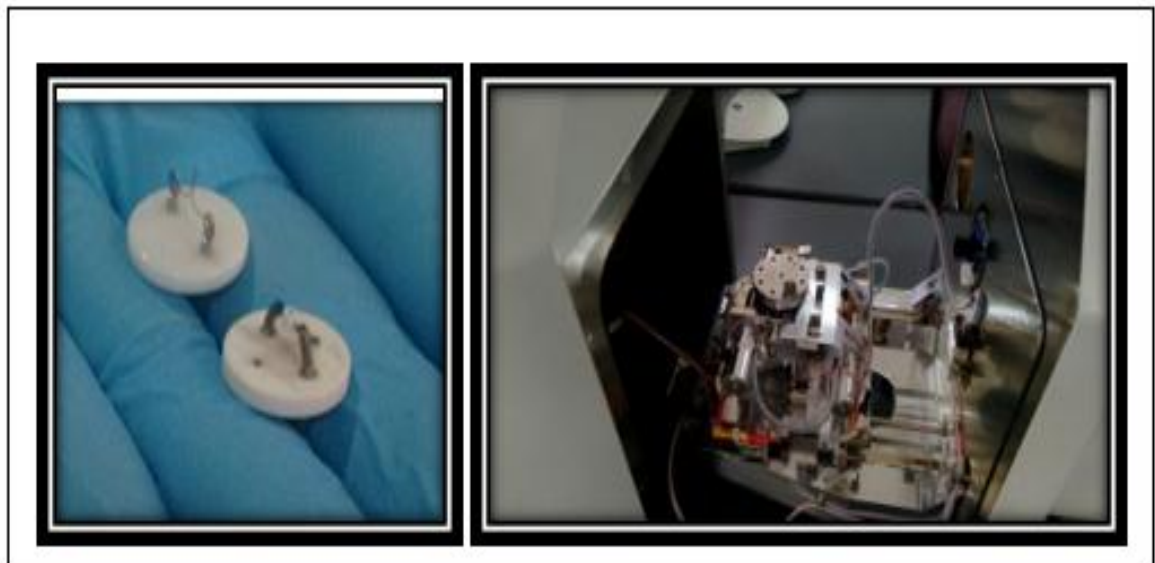
El microscopio electrónico de barrido (MEB) es el mejor método adaptado al estudio de la morfología de las superficies, la imagen entregada por el MEB se genera por la interacción de un haz de electrones que "barre" un área determinada sobre la superficie de la muestra.

El ensayo de microscopia electrónica de barrido se lleva a cabo para determinar la morfología, tamaño, agregados cristalinos y composición química del material sólido particulado, con una muestra de 2 gramos del material, el cual se sometió a un recubrimiento de grafito para que el material sea conductor y evitar la acumulación de cargas eléctricas ya que esta altera la trayectoria de los electrones para poder ser vistos en el microscopio.

Se usó el Microscopio Electrónico de Barrido **CARL ZEISS EVO MA 10** donde se obtiene imágenes de alta resolución de la superficie de la muestra y la morfología del material sólido particulado.

Gracias al MEB podemos identificar los diferentes tipos de granos presentes en la muestra y de esta forma nos proporciona la información individual de cada partícula.

**Ilustración 18.** Filamento y cámara de vacío donde se trata la muestra.



**Fuente:** Autor.

### 3.8 Difracción de rayos X (DRX)

Técnica que sirve para determinar la estructura detallada de un material, es decir, permite conocer la posición que ocupan los átomos, iones o moléculas que lo forman. Debido a este ordenamiento podemos determinar propiedades tanto físicas como químicas de los materiales.

El ensayo de difracción de rayos x se lleva acabo para determinar la composición química de los compuestos del material sólido particulado de la siguiente manera:

Primero se tomó una muestra de un gramo y se macero en el mortero ágata (Ilustración 19) para que la muestra fuera adecuada para su análisis, seguido se realizó el ensayo de difracción de rayos X donde se obtuvieron resultados de la composición de los compuestos del material particulado sólido.

**Ilustración 19.** Preparación de muestra para ensayo de difracción de rayos X.

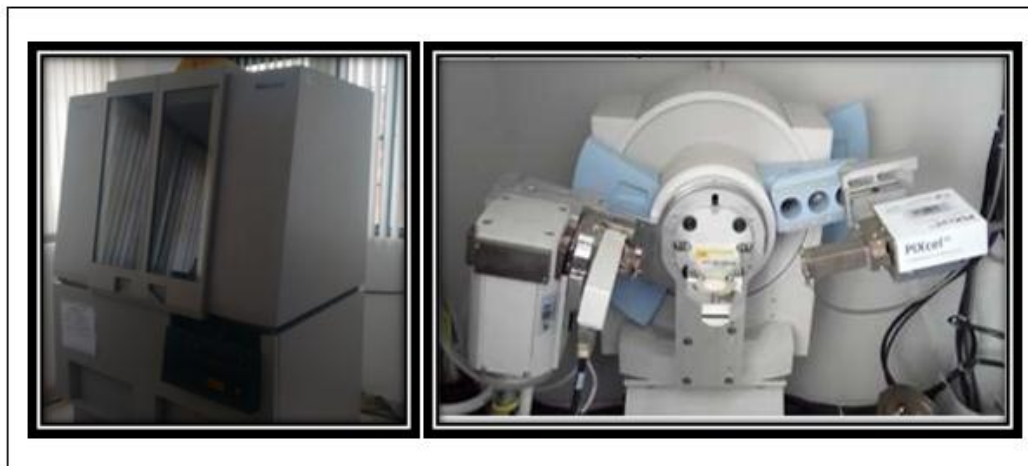


**Fuente:** Autor.

En este proceso se utilizó el equipo de difracción de rayos X de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, **PANALITICAL EXPERT PRO**, con un ánodo de Cu K-Alpha1 [Å]: 1.54060, que posee una configuración de generador de 40mA, 45kV, con un barrido de 20° a 110°, tamaño de paso de 0.02° y tiempo de conteo de 4 segundos, (ilustración 20) para realizar la caracterización química y obtener la composición de cada compuesto dentro de la muestra. Esto se realizó para tener una referencia de dureza según el compuesto obtenido en la muestra.



**Ilustración 20.** Equipo de difracción de rayos x.



**Fuente:** Autor.

El análisis de DRX generalmente sirve para la identificación de fase/composición y la fluorescencia de rayos X en general son análisis complementarios, los cuales proporcionan información sobre las composiciones, fases químicas, y estructuras cristalinas presentes en la muestra.

### **3.9 Granulometría laser**

Es un método rápido para determinar distribuciones de tamaños de partícula tanto en vía seca como en húmeda, se realizó con el fin de complementar el ensayo de granulometría por norma ASTM D 422, el procedimiento se realizó de la siguiente manera:

Se tomó una muestra de 0,5 gramos para someterla a este ensayo en el equipo **MASTER SIZER 3000**, donde se introdujo un vaso de 500 ml con agua destilada, seguido a esto se dan los parámetros para que el equipo inicie, los cuales son, el material a analizar y nivel de reflexión.

El funcionamiento de esta técnica es por medio de unas aspas, el material sólido particulado es agitado para ser succionado por medio de mangueras donde pasa a una cámara en la cual es irradiado con un haz de luz que mide el área transversal de las partículas de la muestra, dando como resultado la granulometría y su densidad, ilustración 21.

**Ilustración 21.** Ensayo de granulometría laser.



**Fuente:** Autor.

### **3.10 Granulometría por tamizado ASTM D-422**

El análisis granulométrico tiene por objeto la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo.

Según sean las características de los materiales finos de la muestra, el análisis con tamices se hace con la muestra entera o bien con parte de ella después de separar los finos por lavado

Este ensayo es realizado con el fin de determinar partículas menores a 4,75mm y mayores a 0,074 mm, la muestra del material sólido particulado en su gran porcentaje es mayor a 0,79 mm, este ensayo es realizado sobre la norma ASTM D422 la cual indica que se debe tomar desde el tamiz N°4 a el N° 200, ilustración 22.

Los tamices designados para este ensayo fueron, 4, 8, 16, 30, 50, 80. 100, 150, 200. El ensayo consiste en someter 200 gramos de muestra y tamizarlo durante un tiempo de 10 minutos o menor. Se hace en dos tiempos ya que solo se pueden introducir 100 gramos, después de terminar el tamizado se procede a pesar lo pasante en cada tamiz, para calcular el porcentaje en peso respectivo.

**Ilustración 22.** Número de tamices.



**Fuente:** Autor.

### **3.11 ASTM G 65 Chorro con arena seca.**

El ensayo se realiza con el fin de evaluar el efecto del material sólido particulado sobre el material de la tubería a la cual impacta, de este se determina la pérdida volumétrica y el tipo de desgaste generado por las partículas.

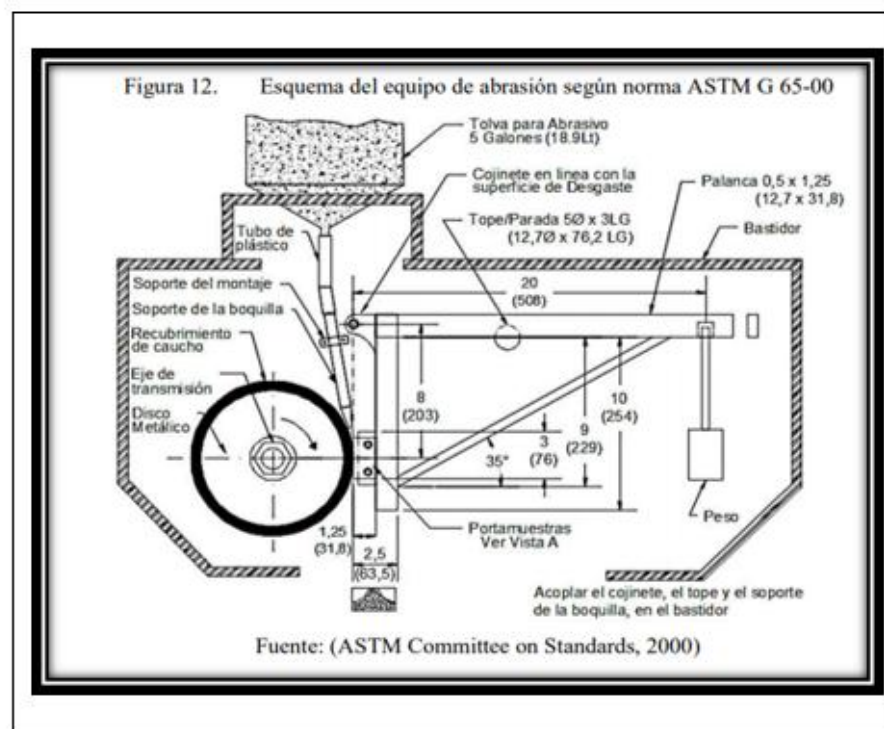
Seguido de los procedimientos de extracción, lavado y secado del material sólido particulado se procede a:

Embazar el material sólido particulado en el equipo de chorro de arena seca (Ilustración 23), donde se proyecta a una frecuencia de 200 rpm donde impactará por 30 minutos a cada una de las probetas de acero API 5L x56 de dimensiones, 76,2 mm largo y 24,5 mm de ancho y 12,7 mm de espesor, sometida a una carga de 130 Newton.

Se sometieron 12 probetas al ensayo de chorro con arena seca, para evaluar el efecto que tiene el material sólido particulado en el acero API 5L x56, seguido a esto se tomó el peso inicial y final de las probetas (Ilustración 24 y tabla 5), con el fin de obtener la diferencia de masa y volumen después del ensayo.

Se realizó el mapeo topográfico de las probetas por medio del microscopio óptico de alta resolución **LEICA**.

**Ilustración 23.** Funcionamiento del equipo de chorro con arena.



**Fuente:** CALERO CALERO. FREDDY VIDAL. Diseño y construcción de una máquina para ensayos en desgaste abrasivo según norma técnica ASTM G65 / COGUANOR 41087 h2II/ 2014-06-18/pág. 18.

**Ilustración 24.** Pesos iniciales.



**Fuente:** Autor.

**Tabla 5.** Pesos iniciales probetas de acero API 5L x65.

N° PROBETAS	PESO (g)
1	233,83
2	230,17
3	265,27
4	259,96
5	269,10
6	257,85
7	247,38
8	260,42
9	255,34
10	293,61
11	252,80
12	253,28

## 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 Caracterización química por medio de fluorescencia de rayos x

A continuación, se detallan los resultados de la composición química obtenida mediante fluorescencia de rayos x.

Los resultados semi-cuantitativos obtenidos para la muestra de material sólido particulado que se realizaron en el equipo **MINIPAL 2**, fueron los siguientes:

**Tabla 6.** Composición de elementos de fluorescencia de rayos X.

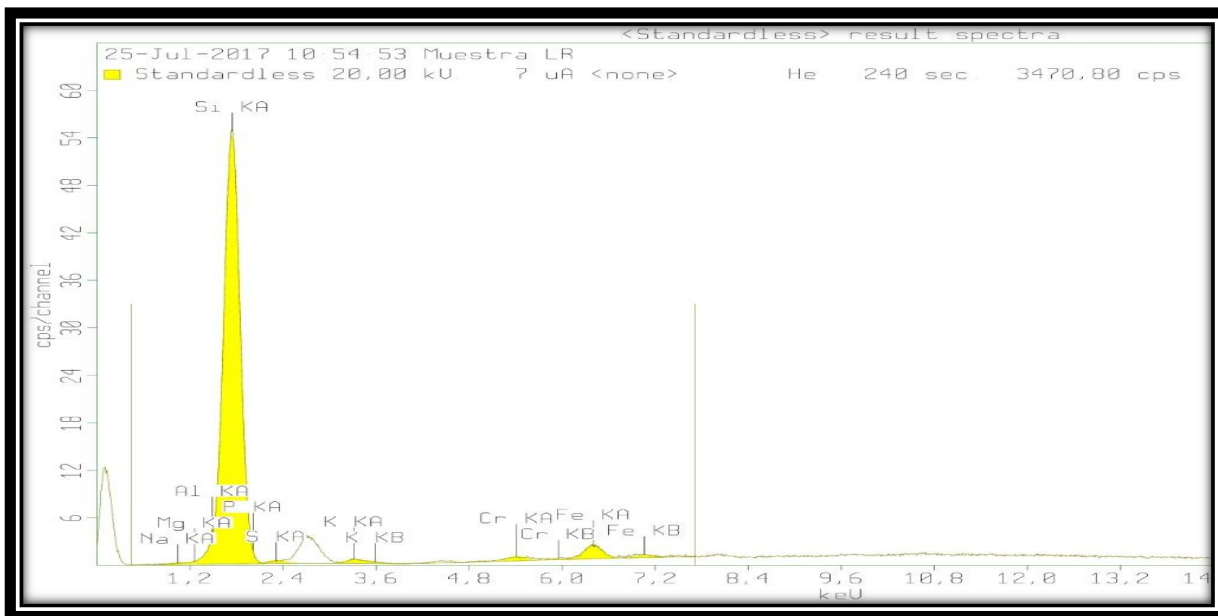
Application		<Standardless>							
Sequence		1 of 1							
Measurement time		25-Jul-2017 10:54:53							
Position		1							

Compound	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Cr	Fe
Conc	3,9	1,3	4,1	89,3	0,05	0,43	0,42	0,14	0,33
Unit	%	%	%	%	%	%	%	%	%

Fuente: Autor.

**Ilustración 25.** Gráfica de resultados según composición de elementos unitarios.



Fuente: Autor.

En la gráfica que nos arroja el equipo **MINIPAL 2** (ilustración 25) podemos determinar el elemento predominante con el pico más alto que en este caso es el silicio (Si), con otro conjunto de elementos en menor proporción. La Gráfica nos muestra en la parte superior los parámetros con los que se desarrolló el ensayo como se había previsto en la metodología.

Podemos observar según la Tabla 6, que el elemento de mayor porcentaje de la muestra es el silicio (Si) con un 89,3%, seguido del aluminio (Al) el cual contiene 4,1%. Se debe tener en cuenta que este tipo de análisis es semi-cuantitativo ya que no se cuenta con las curvas de calibración para hacer análisis cuantitativo.

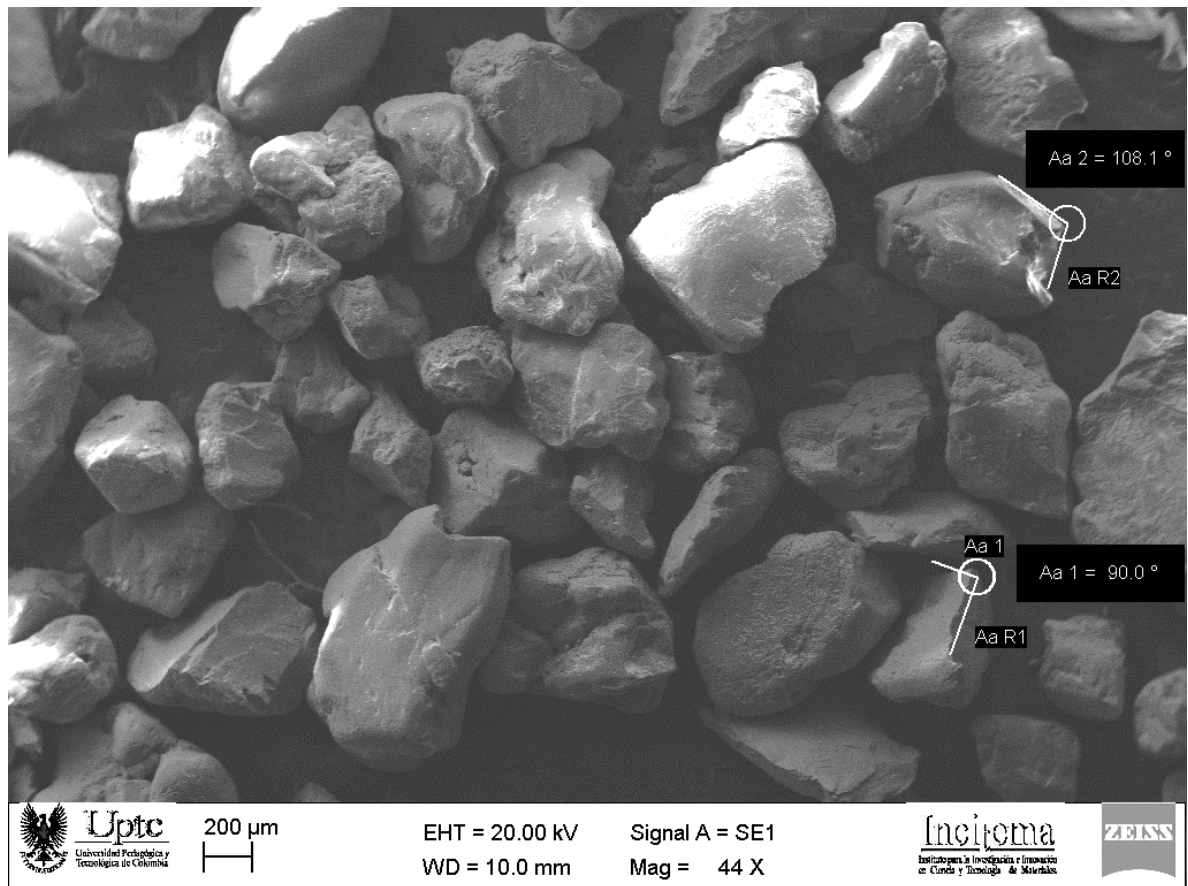
Se analizó otra muestra del material sólido particulado en el equipo de difracción de rayos X, para complementar el ensayo de fluorescencia de rayos X y determinar los compuestos de la muestra.

#### **4.2 Caracterización morfológica mediante el Microscopio Electrónico de Barrido**

Como la forma de las partículas es un factor que afecta directamente el comportamiento del material sólido particulado, se realizó microscopía electrónica de barrido (MEB).

Se tomaron micrografías de las muestras a 44,140, 160, 1000, 2000 y 5000 aumentos, debido a que no hay una norma estandarizada para este ensayo ni para este material, ya que a estos aumentos se tiene una buena área en las micrografías según el punto a analizar.

**Ilustración 26.** Morfología de los granos de material sólido particulado a 44 aumentos.



**Fuente:** Autor.

La micrografía a 44 aumentos se realizó para determinar la forma y tamaño predominante en la muestra del material (ilustración 26). De la cual se observa que la mayoría evidencian aristas en el contorno de las partículas, así como vértices con morfología angular entre 90 y 120°, como la muestra no es uniforme también se encuentra en menor proporción partículas de forma redondeadas.

De esta manera se puede definir que las partículas de forma angular influyen más en el efecto de erosión que las partículas redondeadas debido a que las angulares producen desgaste por fatiga en forma de cráteres profundos y las redondeadas producen microcortes alargados y poco profundos.



**Ilustración 27.** Formas de los granos de arenas.

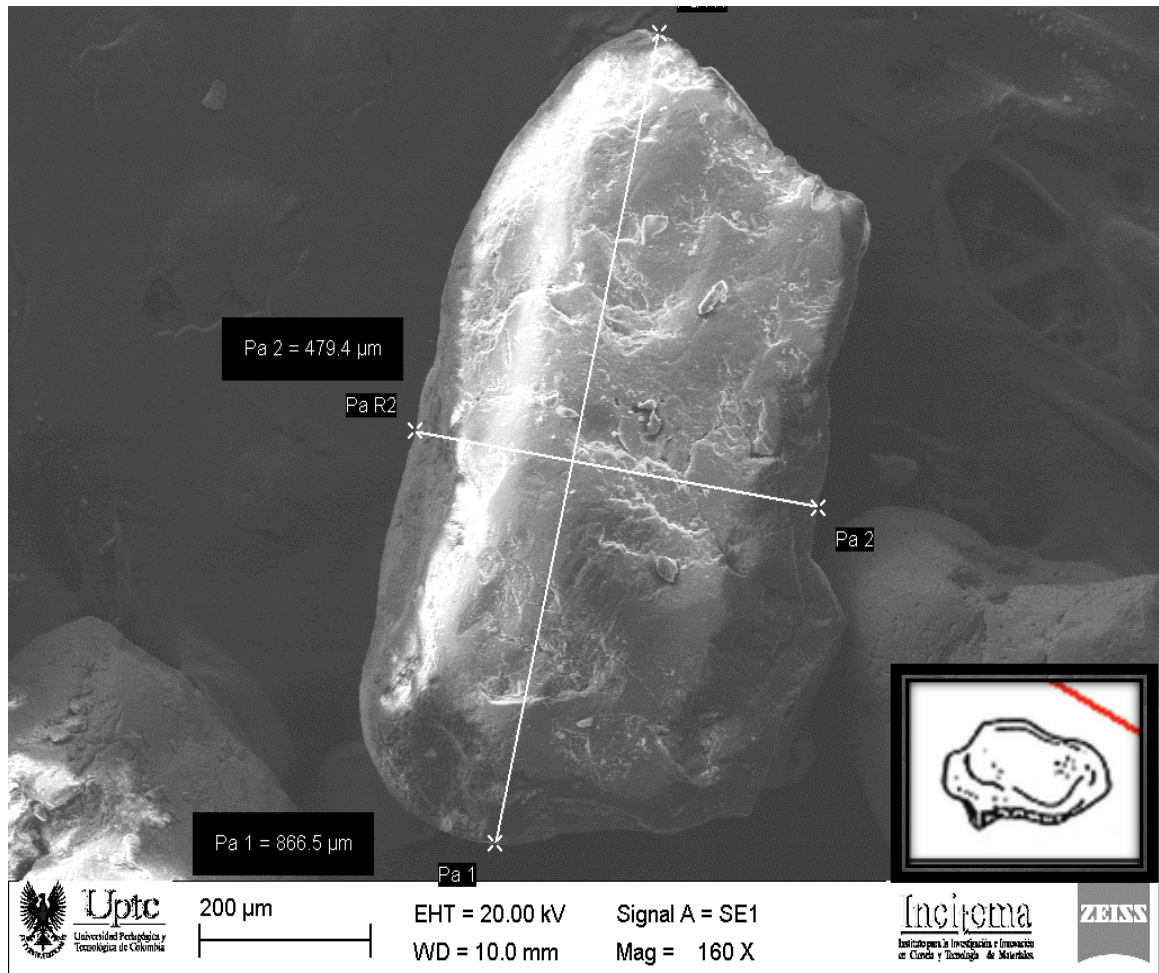
Esfericidad ↓	Muy angular	Angular	Subangular	Redondeada	Redonda	
0,9						Muy esférica
0,7						Esférica
0,5						Semiesférica
0,3						Poco esférica
Redondez →	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	

**Fuente:** Manual de arenas de fundición.

Se toman las ilustraciones 26, 28 y 29 para comparar con la ilustración 27 del manual de arena de fundición<sup>30</sup> según esta se observa que la morfología predominante de las partículas de la muestra es angular con una esfericidad de 0.7 y una redondez de 0.3 el cual se encuentra en el círculo rojo y las partículas redondeadas con 0.7 de esfericidad y 0.9 de redondez se encuentran dentro del círculo azul.

<sup>30</sup> EDOARDO CAPELLO, manual de arenas de fundición, segunda edición, editorial Gustavo Gill.

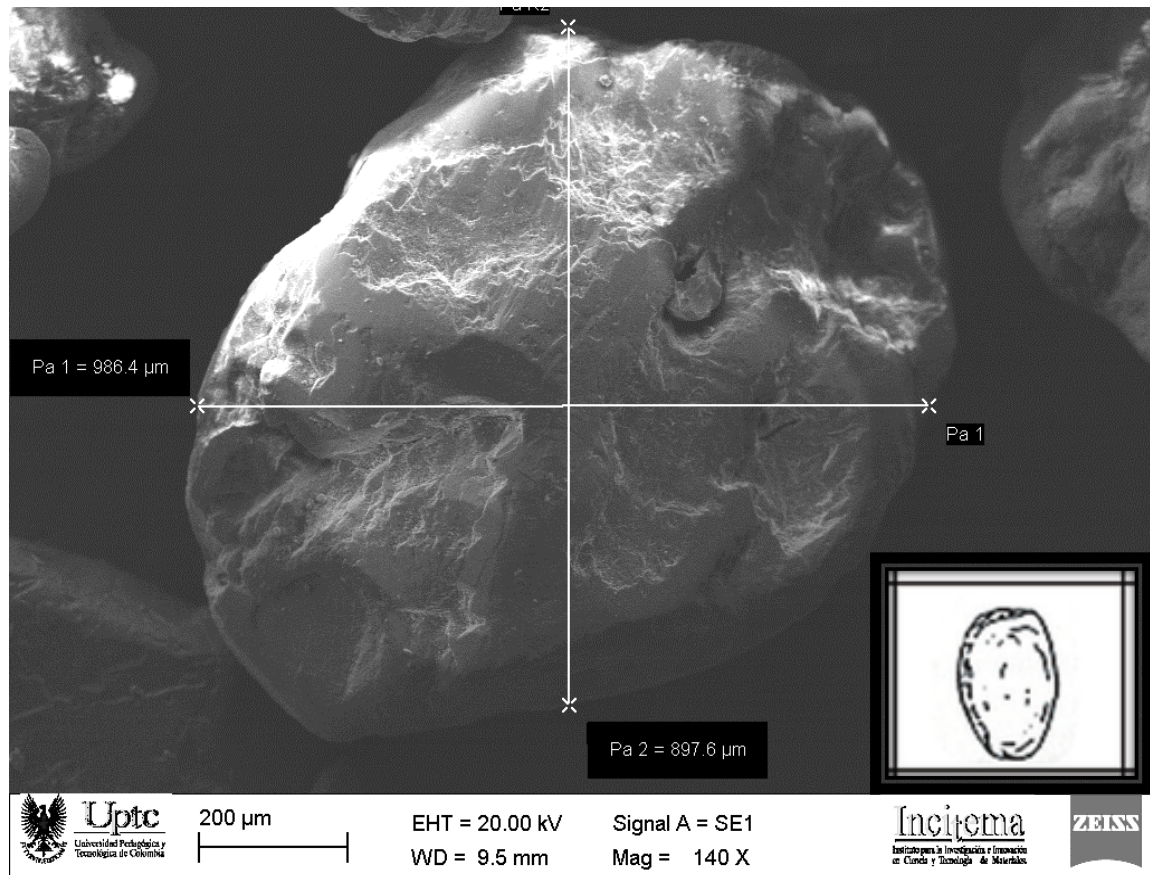
**Ilustración 28.** Partícula de material particulado a 160 aumentos.



**Fuente:** Autor.

La morfología hallada en la micrografía de la ilustración 28 y comparada con el teórico de la ilustración 27 nos indica que la partícula es angular y se conoce que la erosión más efectiva para materiales dúctiles como frágiles se encuentra asociada a las partículas angulares, formando una deformación de desgaste por fatiga en forma de cráteres profundos con contornos irregulares.

**Ilustración 29.** Dimensiones de los granos a 140 aumentos.

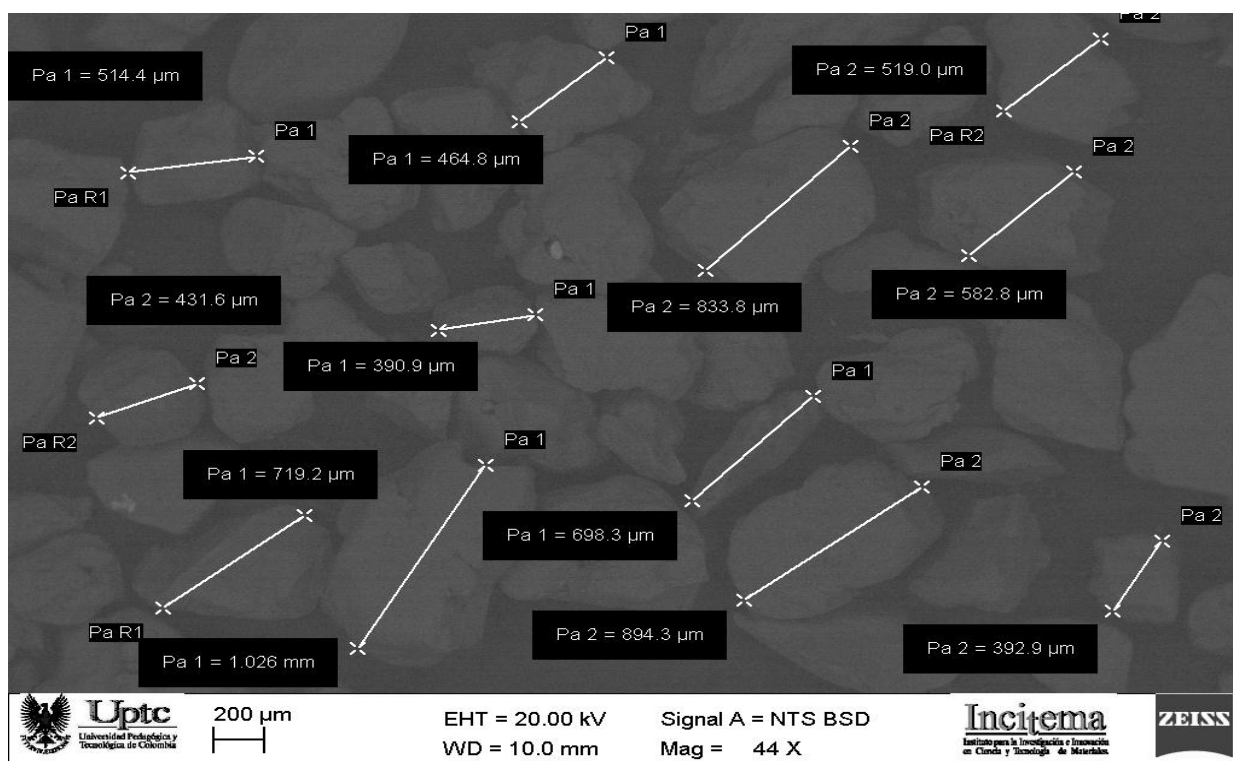


**Fuente:** Autor.

La morfología hallada en la micrografía de la ilustración 29 y comparada con el teórico de la ilustración 27 nos indica que la partícula es redondeada, las cuales producen un efecto menos abrasivo en la erosión formando microcortes y pequeños cráteres con contornos más definidos y de poca penetración.

La micrografía de la ilustración 30 se realizó como complemento del ensayo de granulometría por norma ASTM D 422 para determinar un promedio del tamaño de 12 partículas al azar, tomadas de la micrografía a 44 aumentos, con el fin de apreciar estadísticamente el tamaño de las partículas por individual.

**Ilustración 30.** Tamaño predominante del material sólido particulado.



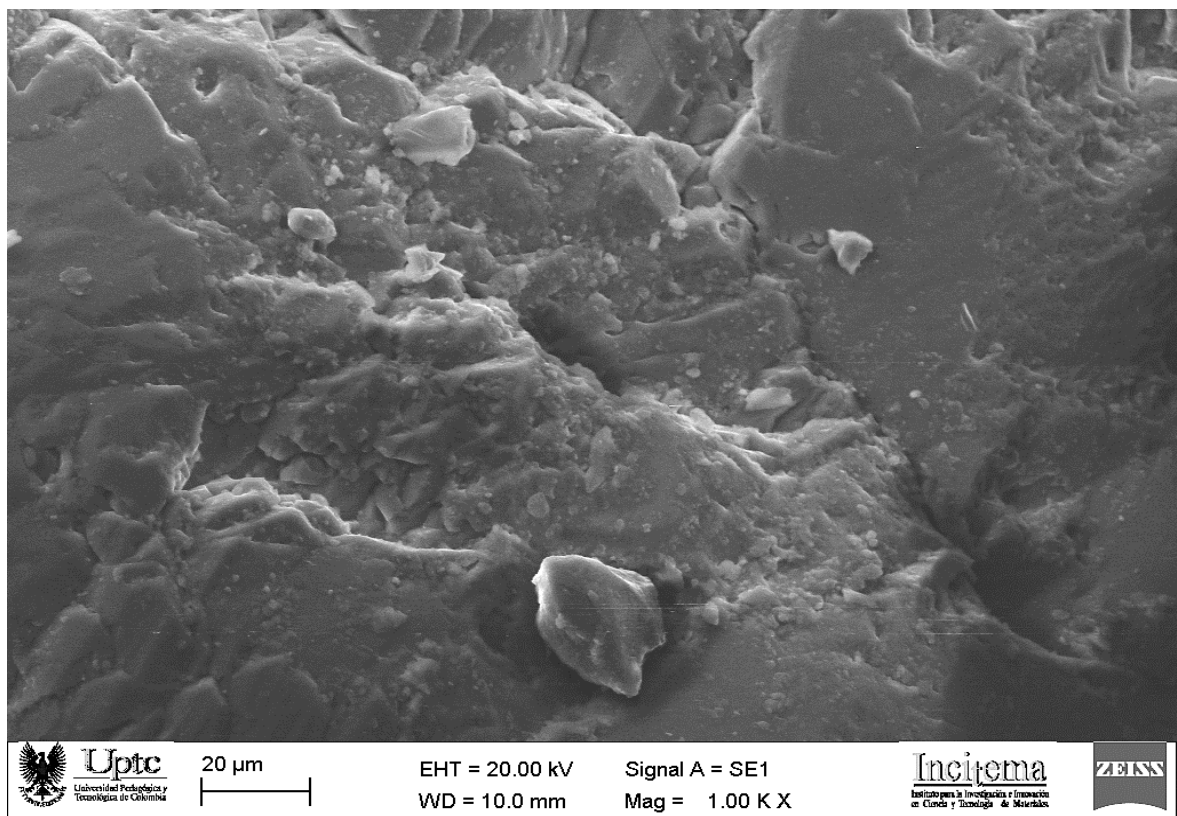
**Fuente:** Autor.

El tamaño promedio de las partículas es 622.3  $\mu\text{m}$  (0.622 mm), lo cual indica que se encuentra en el rango de tamaño de partícula similar al de los resultados de los ensayos de granulometría laser y el realizado bajo la norma ASTM D422, estos son tamaños de partículas superiores a 100  $\mu\text{m}$  (0.1mm) y según el teórico de M.M Stack y Mazdak Parsi citados anteriormente, estos definen que la velocidad de erosión no es una variable de influencia relevante si el tamaño de partícula supera las 100  $\mu\text{m}$ .

Las micrografías a 1000, 2000 y 5000 aumentos se realizaron para observar el tipo de superficie que posee la partícula y determinar la descripción de sus agregados cristalinos, (ilustraciones 31, 32 y 33)

En las siguientes ilustraciones podemos observar la forma, el tamaño y el aspecto de la superficie de las partículas que es característico de la sílice, la cual tiene agregados cristalinos en forma de drusa. Una drusa es cuando está cubierta por una capa de pequeños cristales.

**Ilustración 31.** Grano de material particulado a 1000 aumentos.



**Fuente:** Autor.



Como se observa en la ilustración 31 las placas del cristal están sobrepuestas en forma de macla, se puede tener en cuenta que este material es propio de la sílice ya que posee el aspecto de los agregados cristalinos son similares a los del cuarzo.

Como se asemeja la apariencia de las micrografías y la composición química del material sólido particulado al cuarzo, se establece que este posee propiedades físico químicas similares, como son: dureza, densidad, aspecto superficial. De esto se puede definir que posee una dureza similar a la del cuarzo la cual es de 7 en la escala de Mohs y 820 en la escala de Knoop como se observa en la tabla 7, el cual al ser comparado con el acero API 5L X56 que posee una dureza de 140 a 180 Brinell, la cual equivale de 164 a 206 Knoop, demostrando que el material sólido particulado es más duro que el acero.

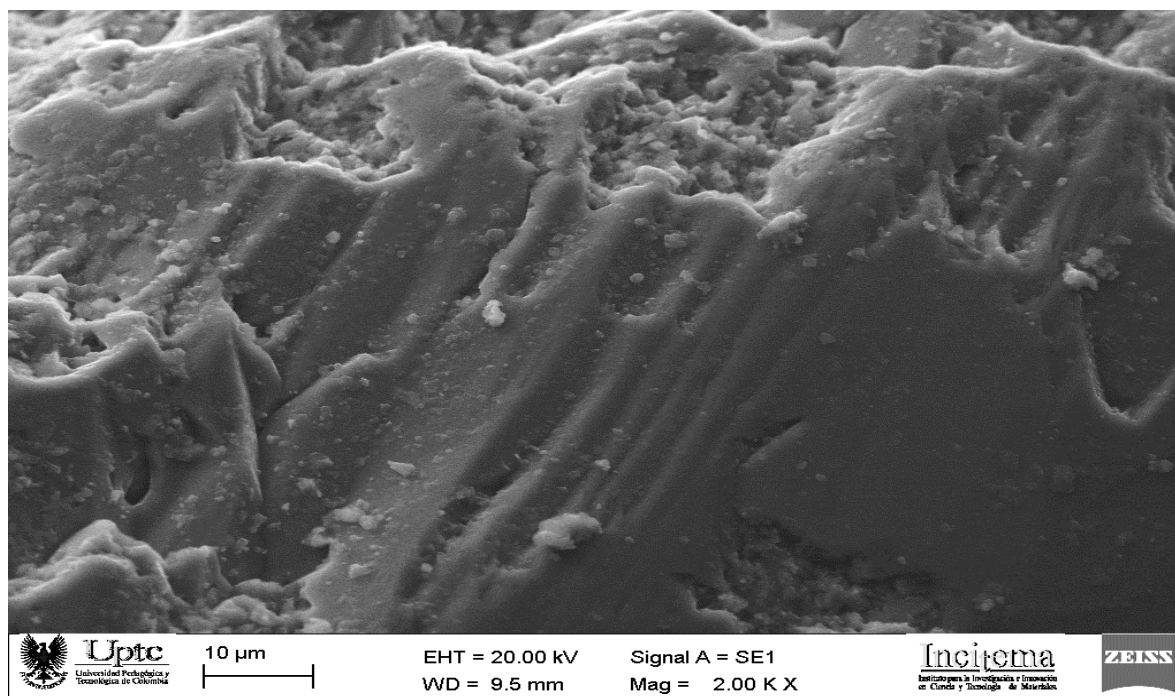
**Tabla 7. Escalas de durezas.**

Escalas de Mohs Rosiwal y Knoop			
mineral	MOHS	ROSIWAL	KNOOP
talco o grafito	1	0.03	1
yeso o azufre	2	1.25	32
calcita	3	4.5	135
fluorita	4	5	163
apatito	5	6.5	430
ortoclasa o feldespato	6	37	560
cuarzo	7	120	820
topacio	8	175	1340
corundo	9	1000	1800
diamante	10	140000	7000

**Fuente:** Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales”. Callister, W.D. Ed. Reverté S.A., Barcelona.

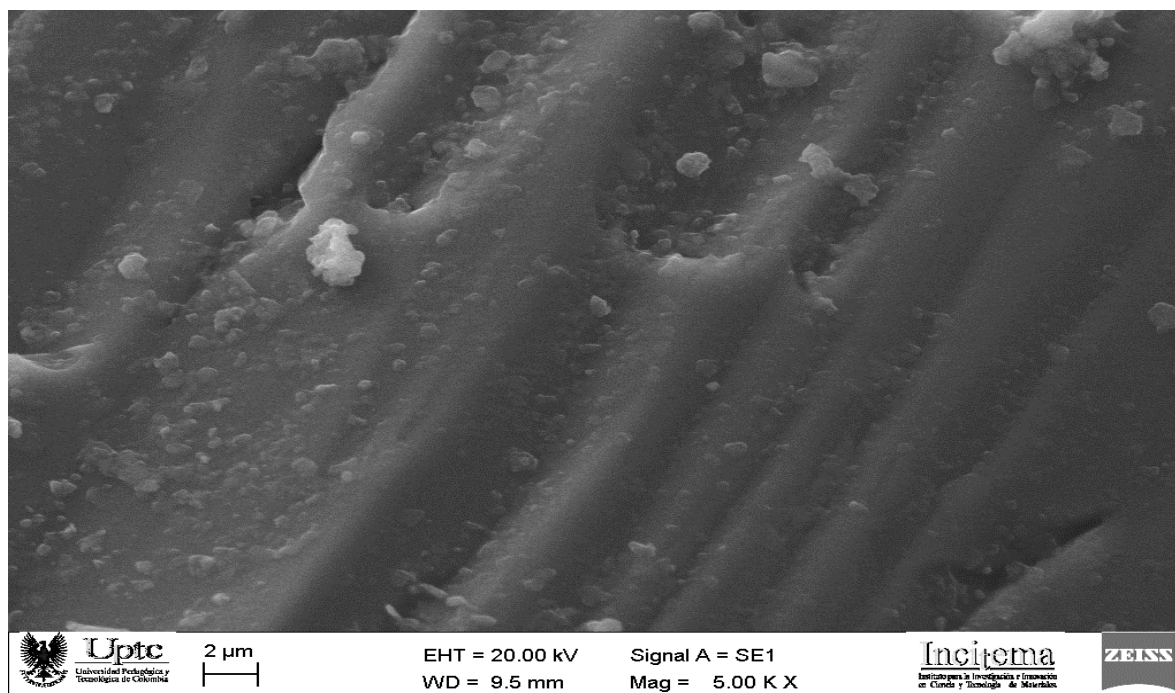
En las siguientes micrografías de 2000 y 5000 aumentos (ilustraciones 32 y 33), se observa con mayor detalle la superficie del material sólido particulado donde se detalla la superficie en forma de macla o drusa descrito anteriormente característico de la sílice.

**Ilustración 32.** Morfología de material particulado sólido a 2000 aumentos.



**Fuente:** Autor.

**Ilustración 33.** Morfología de material particulado sólido a 5000 aumentos.



**Fuente:** Autor.

### 4.3 Determinación de los compuestos por medio de difracción de rayos x

A continuación, se detallan los resultados de los compuestos químicos determinados por medio del DRX

En el difractograma (ilustración 34) se observa que el concentrado de material sólido particulado contiene en mayor proporción sílice ( $\text{SiO}_2$ ). Gracias a este resultado se establece la composición del material el cual no es bueno para el fenómeno de erosión ya que posee una dureza superior a la de la tubería como ya se había descrito anteriormente.

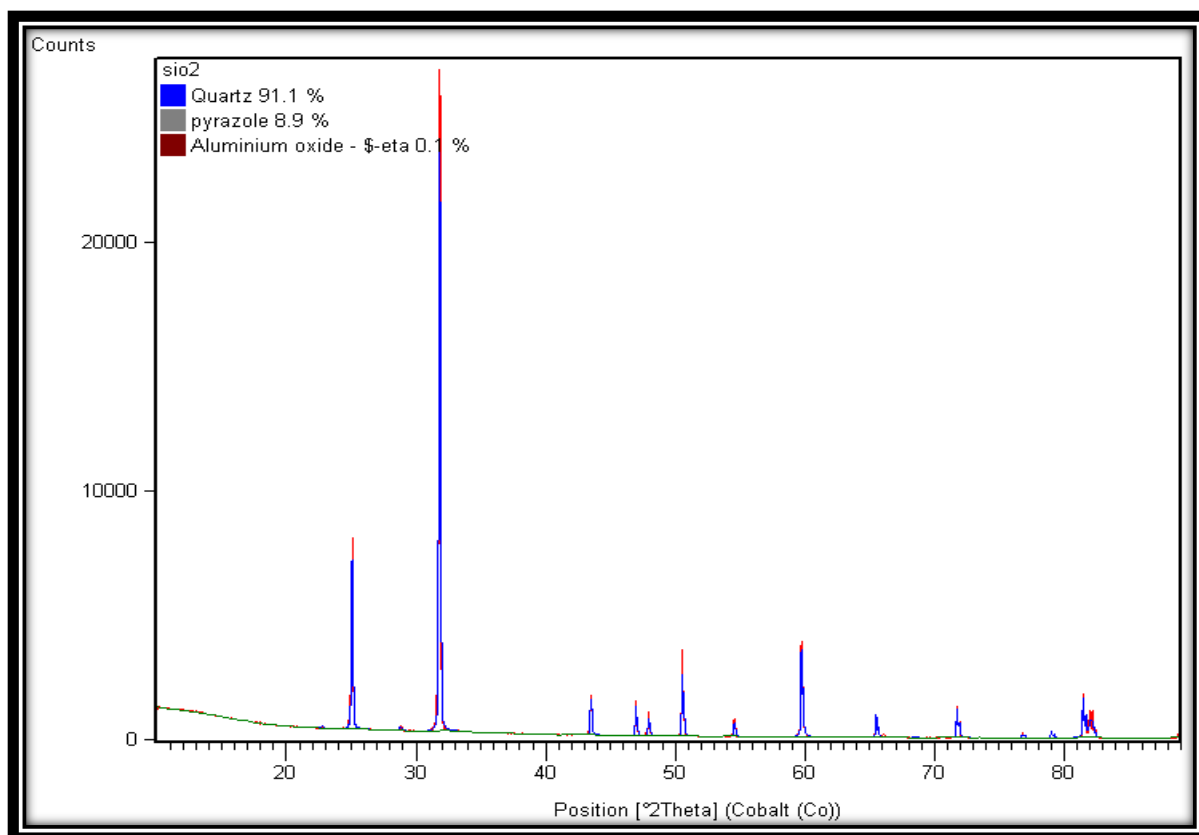
En una pequeña proporción se encuentra pyrazole ( $\text{C}_3\text{H}_4\text{N}_2$ ) el cual es debido a sustancias orgánicas que no fueron removidos en su totalidad en el lavado del material sólido particulado, esta es la manera en el que el equipo de DRX nos da estos compuestos, no se puede hallar con exactitud debido a que el equipo no analiza muestras orgánicas, y por su bajo porcentaje no interfiere con análisis de las muestras.

Por último, se encuentra en una mínima cantidad alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), la cual no se puede apreciar a la vista en el MEB debido a que su porcentaje es demasiado bajo y es muy complicado hallarlo en las micrografías, pero no se puede descartar ya que la dureza de este compuesto es alta y puede afectar también la tubería.

En la tabla 8 se reportan los datos obtenidos por el equipo de difracción de rayos x en el cual podemos apreciar los compuestos químicos hallados en la muestra del material sólido partícula.



**Ilustración 34.** Gráfica de porcentajes de los compuestos presentados del material particulado sólido.



**Fuente:** Autor.

**Tabla 8.** Reporte DRX.

No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score	Scale ...	Display Color	Quality	Subfiles	Crystal System
1		96-901-2602	Quartz	Si3.00 O6.00	17	0.106	Blue	=	User I...	Hexagonal
2		96-151-2015	pyrazole	N16.00 H32.00 C24.00	19	0.188	Gray	=	User ...	Orthorhombic
3		96-120-0016	Aluminium oxide...	O32.00 Al21.35	16	0.016	Mar...	=	User I...	Cubic

**Fuente:** Autor.

Del ensayo se obtuvo que el material sólido particulado contiene un 91,1% de cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) en comparación con el equipo de fluorescencia que indica que posee un 89,3% de silicio (Si) y con respecto a la alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) da un porcentaje muy bajo de 0,1% y en comparación del equipo de fluorescencia este arroja que poseía un 4,1% de aluminio (Al).

Esta diferencia del porcentaje de silicio es debido a que el equipo de fluorescencia no posee patrón para muestras de silicio por lo tanto los porcentajes de cantidades son aproximados mas no son exactas.

**Ilustración 35.** Densidad y volumen obtenidos del equipo de difracción de rayos x

Calculated density (g/cm <sup>3</sup> ):	2.80
Volume of cell (10 <sup>6</sup> pm <sup>3</sup> ):	106.82

**Fuente:** Autor.

Gracias al equipo de difracción de rayos x se obtuvo la densidad del material sólido particulado que es de 2.8 g/cm<sup>3</sup> (ilustración 35) con el cual se puede determinar que el material es similar al cuarzo ya que este posee una densidad de 2.65 g/cm<sup>3</sup> y otras características ya mencionadas anteriormente.

#### 4.4 Tamaño de las partículas por medio de granulometría laser

Los resultados obtenidos por el ensayo de granulometría laser arrojan la siguiente información:

El 10% de la distribución tiene un tamaño inferior a 158µm.

El 50% de la distribución tiene un tamaño inferior a 382µm.

El 90% de la distribución tiene un tamaño inferior a 754 µm.

De los resultados podemos deducir que la mayor cantidad de material se encuentra en el rango de 382 y 754 µm, según el ensayo de granulometría laser las partículas son de un tamaño mayor a 100 µm, y tomando la referencia de M.M. Stack G. y colaboradores (2003), los cuales encontraron que para este tamaño de partículas la velocidad de erosión no es dependiente del tamaño de las partículas ya que la velocidad de erosión solo es un factor a tener en cuenta si el tamaño de partícula esta entre 50 y 100 µm.

Como podemos observar en la ilustración 37 la mayor parte de las partículas son de un tamaño de 754 µm esto quiere decir que, según el teórico planteado, la velocidad de erosión en la tubería API 5L X56 es alta debido a que las partículas son de gran tamaño.

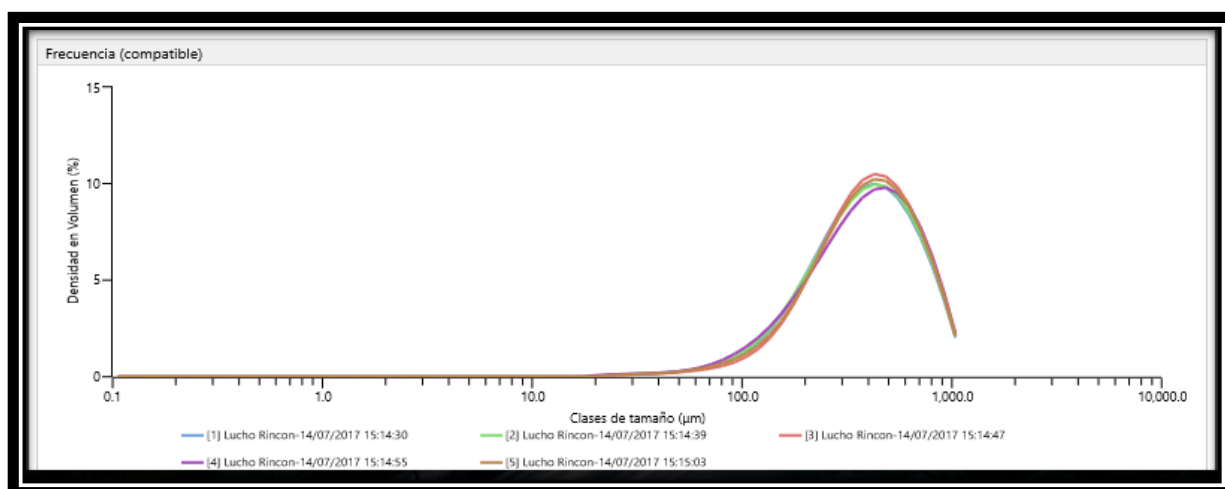
El ensayo realizado por espectrometría de difracción de rayos laser, dio como resultado la distribución granulométrica del material sólido particulado, con los siguientes parámetros.

**Ilustración 36.** Parámetros para el ensayo de granulometría laser.

Análisis	Resultado
Nombre de la partícula Silica SiO2	Concentración 0.0882 %
Indice de Refracción de la Partícula 1.457	Anchura 1.558
Índice de Absorción de la Partícula 0.010	Uniformidad 0.477
Nombre del dispersante Water	Area de Superficie Específica. 8.065 m²/kg
Indice de refracción del Dispersante 1.330	D [3;2] 281 µm
Modelo de Dispersión Mie	D [4;3] 422 µm
Modelo de Análisis Uso General	Dv (10) 158 µm
Residual Ponderado 2.46 %	Dv (50) 382 µm
Obscuración del Láser 2.41 %	Dv (90) 754 µm

**Fuente:** Autor.

**Ilustración 37.** Curva de granulometría Vs densidad de volumen.



**Fuente:** Autor.

Debido a que el equipo **MASTER SIZER 3000** no posee lectura de partículas superiores a 1000μm (1 mm) se complementó el ensayo por el análisis granulométrico por tamizado bajo la norma ASTM D 422.

#### 4.5 Tamaño de partículas por tamizado (ASTM D422)

Los resultados arrojados después de realizar el ensayo de granulometría a los 200 gramos de material sólido particulado se categorizó en la tabla 9 en la cual se puede observar el número del tamiz, tamaño de apertura, peso, porcentaje, porcentaje acumulado y porcentaje de pasantes para obtener la cantidad de material retenido en cada tamiz con sus respectivos pesos y de esta manera determinar el tamaño predominante de las partículas que hay en la muestra.

Gracias a los datos obtenidos se elaboraron las gráficas dónde se realiza un análisis de este ensayo (ilustraciones 38 y 39).

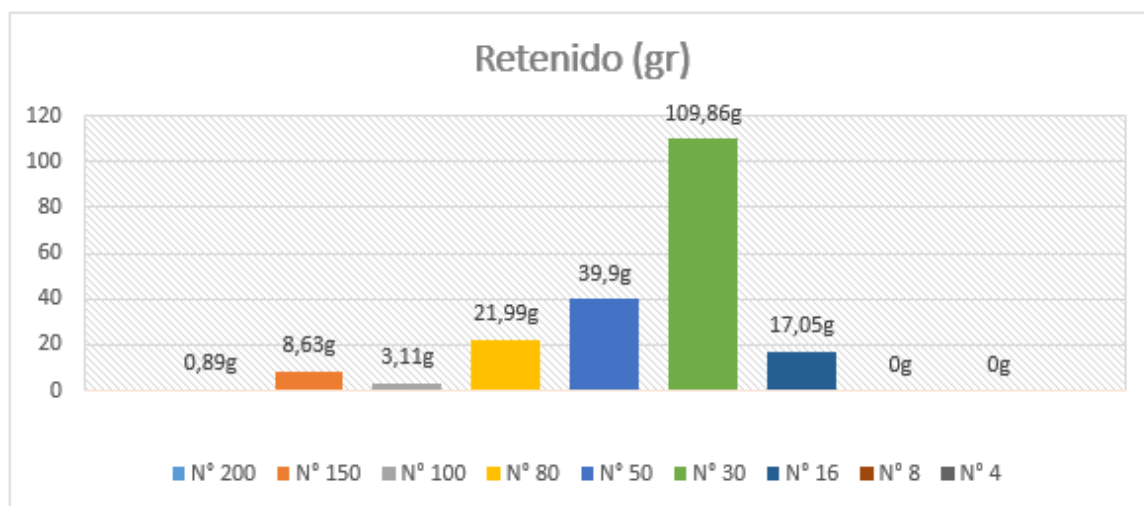
**Tabla 9.** Análisis granulométrico del material sólido particulado.

Número de tamiz	Apertura en mm	Peso (g)	Porcentaje	Porcentaje acumulado	% Pasante
4	4.76	0	0	0%	100%
8	2.38	0	0	0%	100%
16	1.19	17.05	8.46%	8.46%	92%
30	0.595	109.86	54.54%	63.00%	37%
50	0.297	39.9	19.81%	82.81%	17%
80	0.177	21.99	10.92%	93.73%	6%
100	0.149	3.11	1.54%	95.27%	5%
150	0.106	8.63	4.28%	99.56%	0%
200	0.074	0.89	0.44%	100.00%	0%
		201.43	100%		

**Fuente:** Autor.

En la siguiente ilustración observamos detalladamente el porcentaje de cantidad que hay por tamaño retenido en cada tamiz, donde se detalla que la mayor proporción se encuentra en el tamiz malla número 30, el cual se encuentra en un rango de 0.595 a 1.19 mm lo cual concuerda con el ensayo de granulometría laser que por teoría descrita anteriormente no interviene directamente en la velocidad de erosión.

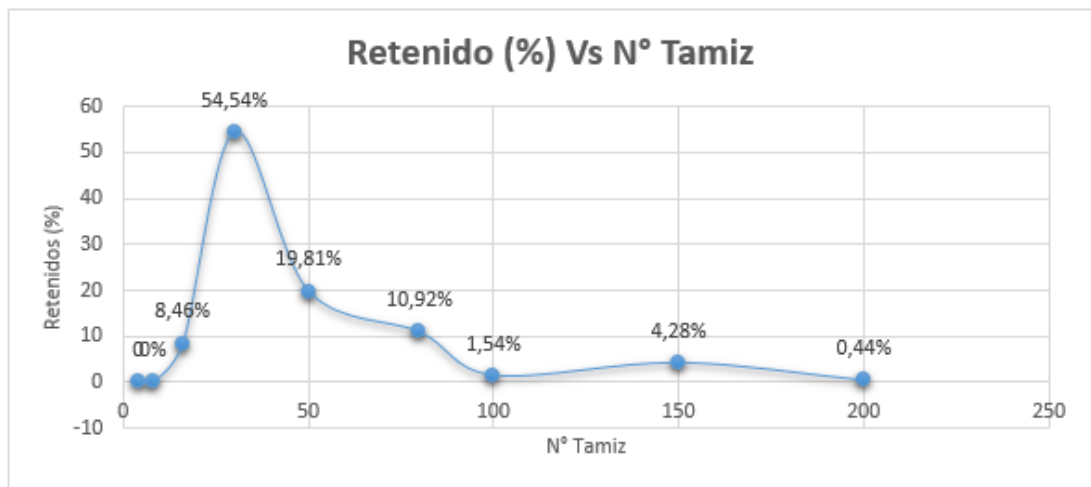
**Ilustración 38.** Gráfica de barras, Retenidos en gramos.



**Fuente:** Autor.

Como se observa en la ilustración 39, el número de tamiz donde se encuentran la mayoría de porcentaje de retenido es el tamiz N° 30 con 109,86 g con un 54,54% del total de la muestra, el tamiz posee una apertura de 0,595 mm a 1.19 mm.

**Ilustración 39.** Gráfica, Retenidos (%) Vs N° Tamiz.



**Fuente:** Autor.

Con base a los resultados del ensayo observamos que el tamaño de grano predominante se encuentra entre el tamiz 30 al 16, en el cual están ubicadas las partículas de tamaños mayores a 0,595 mm y menores a 1,19 mm, con respecto al ensayo de granulometría laser, estos resultados son similares ya que las granulometrías arrojadas están en el rango, las cuales fueron las siguientes:

El tamaño de la partícula predominante en el ensayo de Granulometría laser está por debajo de los 754µm (0.754 mm) y el obtenido por el microscopio electrónico de barrido por promedio es de 622µm (0.622 mm), estos ensayos fueron complementarios para la verificación del resultado del objetivo propuesto inicialmente por medio de la norma ASTM D 422 en el cual se obtuvo un tamaño de partícula de 0.595 mm, los resultados se encuentran en el rango establecido. Según la teoría planteada anteriormente los valores de tamaño de partícula mayores a 100µm (0.1 mm) no influyen en la velocidad de erosión ya que depende de otras variables, como puede ser, velocidad de flujo (Caudal), Presión, Temperatura, tipo y características del fluido.

En la tabla 10 se puede catalogar el tamaño de las partículas como arenas medias las cuales se encuentran en el rango de 420µm a 2000µm (0.42 a 2.0 mm) según la clasificación de suelos de ASTM D 2487.

**Tabla 10.** Clasificación de suelos ASTM D 2487

	Tamaño mínimo (mm)	Tamaño máximo (mm)
Grava	4.76	75
Arena Gruesa	2.00	4.76
Arena Media	0.42	2.00
Arena Fina	0.075	0.42
Limo	0.005	0.075
Arcilla	0.001	0.005
Coloides	-	0.001

**Fuente:** Lucio Gerardo Cruz Velasco, mecánica de suelos I.

#### 4.6 Chorro con arena seca

Los resultados obtenidos en el ensayo guiado por la norma ASTM G 65 obtenidos fueron los siguientes:

**Tabla 11.** Resultados del ensayo de chorro con arena seca ASTM G 65.

RESULTADO DEL ENSAYO DE CHORRO CON ARENA SECA				
# PROBETA	MASA INICIAL (g)	MASA FINAL (g)	PERDIDA DE MASA (g)	PERDIDA VOLUMETRICA (mm3)
1	233.83	233.09	0.74	92.5
2	230.17	229.7	0.47	58.75
3	265.27	264.83	0.44	55
4	259.96	259.36	0.6	75
5	269.1	268.84	0.26	32.5
6	257.85	257.37	0.48	60
7	247.38	247.09	0.29	36.25
8	260.42	260.27	0.15	18.75
9	255.34	255.11	0.23	28.75
10	293.61	293.41	0.2	25
11	252.8	252.29	0.51	63.75
12	253.28	252.69	0.59	73.75
<b>PROMEDIO</b>	<b>256.58</b>	<b>256.17</b>	<b>0.41</b>	<b>51.67</b>
<b>DESVIACION ESTANDAR</b>	<b>16.40</b>	<b>16.50</b>	<b>0.19</b>	<b>23.16</b>

De acuerdo a los resultados obtenidos por el ensayo de chorro con arena seca de la norma ASTM G65 se puede observar que la pérdida promedio en volumen de las probetas de acero API 5L x56, fue de 51.67 mm<sup>3</sup> lo cual representa un 0.16% de pérdida del material, de lo cual se puede concluir en el **procedimiento A**, de la norma descrito en el marco referencial, la cual indica que el acero sufre una muy baja pérdida de masa “ en un rango de perdida de volumen calificado de 36 a 65 mm<sup>3</sup>, de lo cual se puede determinar que es un material con alta resistencia al desgaste provocado por el material sólido partícula estudiado en este proyecto.

A continuación, se observar en la tabla 12, la profundidad que deja el material sólido particulado en micras a las 12 probetas, analizadas en el microscopio óptico de alta resolución LEICA con el lente Vz75. De esta determinamos que las partículas penetraron en un promedio de 33.68 µm causando un efecto mínimo de erosión sobre el acero, este resultado es favorable ya que por la diferencia de durezas entre el material sólido particulado y el acero se esperaba que fuera más agresivo el efecto de la erosión, por lo contrario, este presenta una alta resistencia a la abrasión.

**Tabla 12.** Registro de profundidad.

NUMERO PROBETA	PROFUNDIDAD EN (µm)
1	98.9
2	23.4
3	22.1
4	61.1
5	11.9
6	54.3
7	13.2
8	2.8
9	9.49
10	2.55
11	39.2
12	65.3
<b>PROMEDIO</b>	33.68

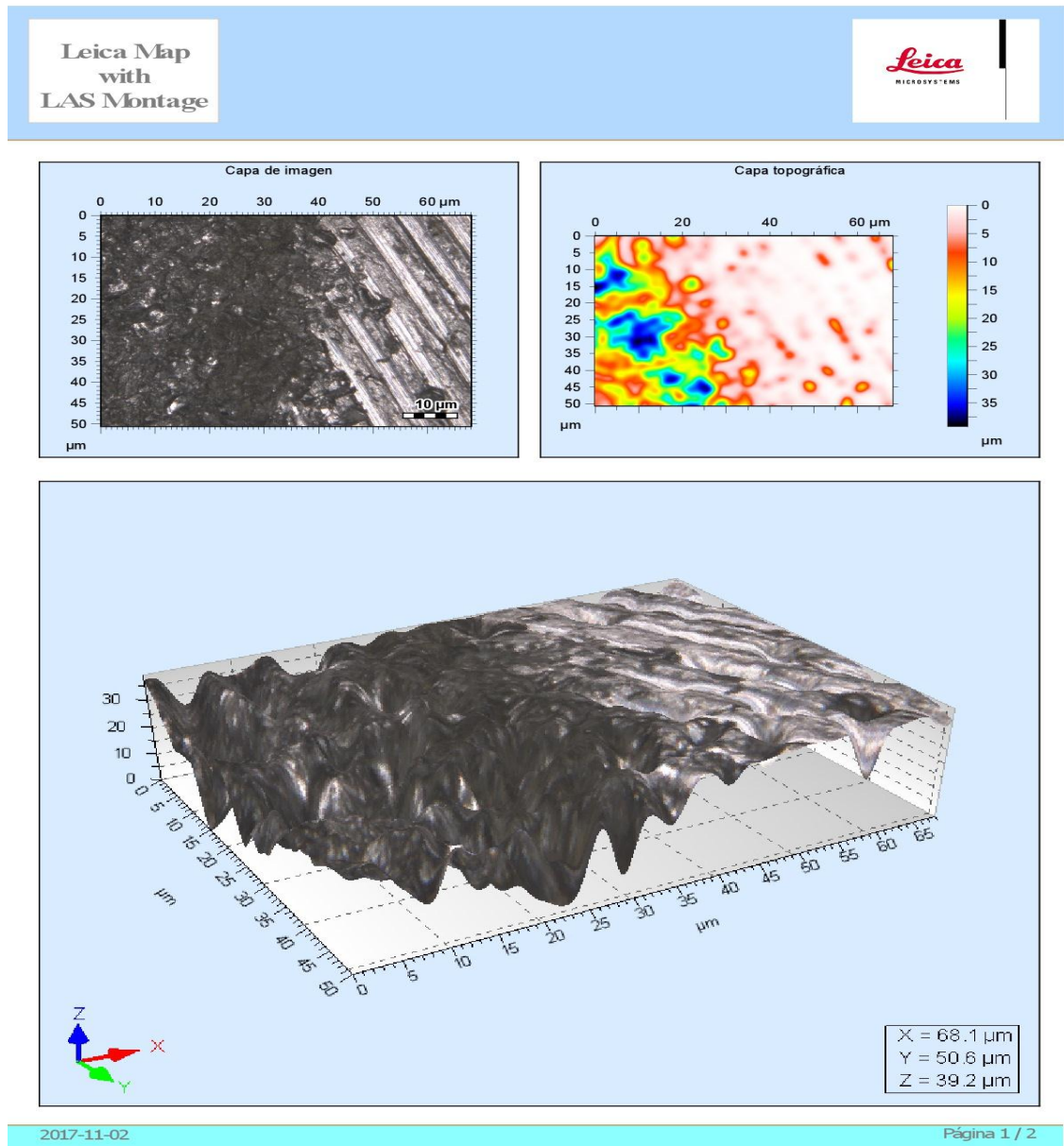
**Fuente:** Autor.



#### 4.7 Topografía de las probetas

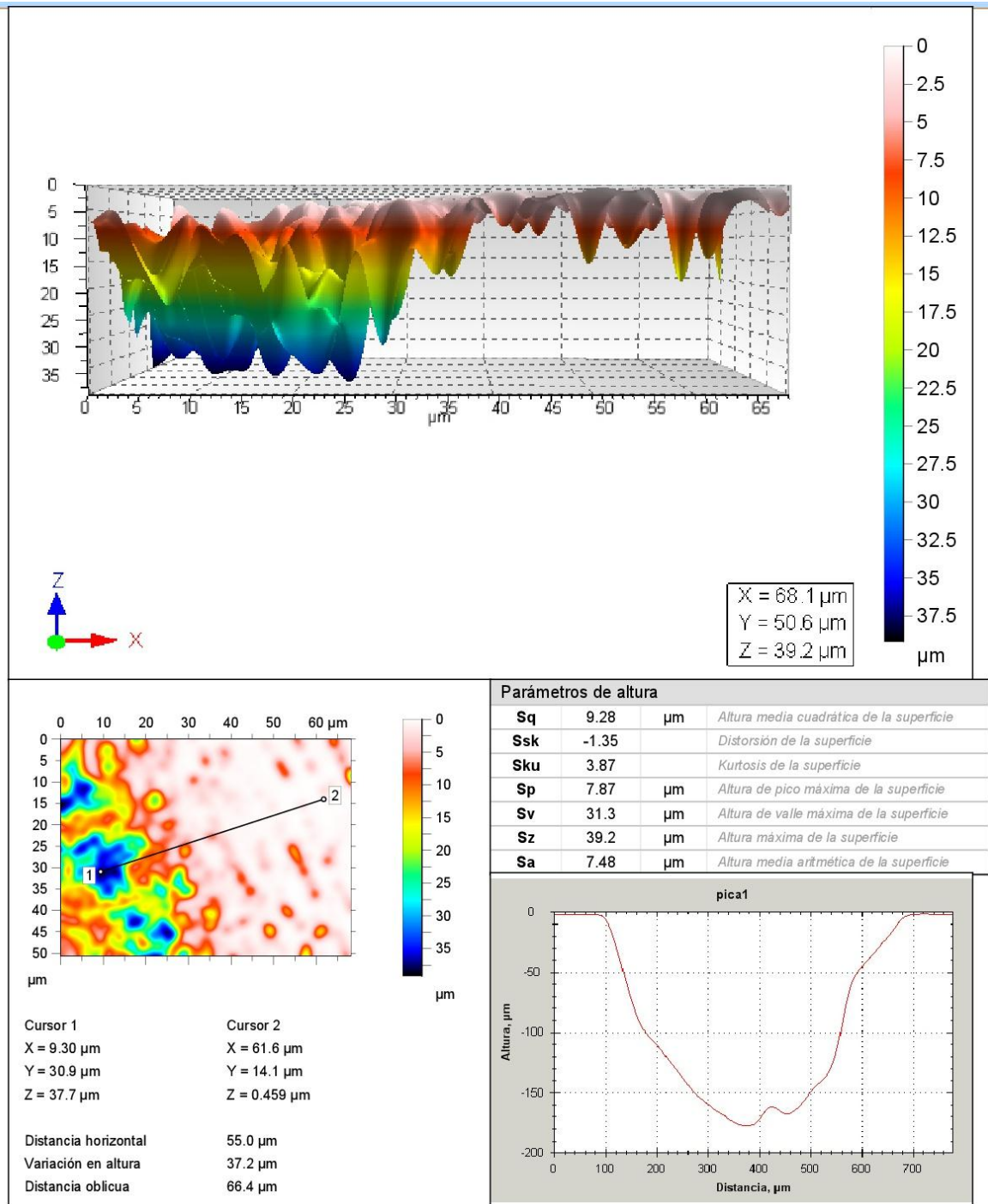
Se realizó un mapeo topográfico de las huellas dejadas en las probetas por el ensayo de chorro con arena seca.

**Ilustración 40.** Mapa topográfico.



**Fuente:** Autor.

Ilustración 41. Mapa topográfico.



Fuente: Autor.

Del mapeo topografico se obtiene la vista tridimensional de las huellas en las probetas dejadas por el ensayo de la norma ASTM G 65 de las cuales se observa:

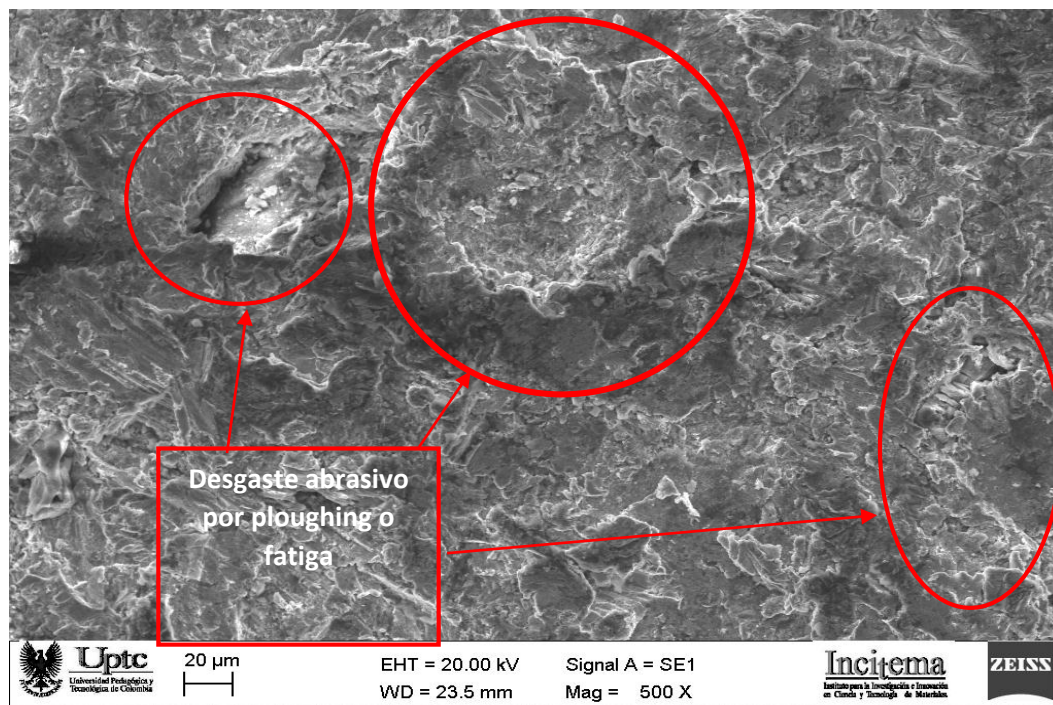
- Profundidad: distribuido por la escala de colores según su profundidad.
- Tipo de impacto: forma en la que la partícula choca con el material.

Con respecto a la topografía se analiza que la erosión causada por el material sólido particulado en forma de valles y crateres es debido a la morfología angular y redondeadas de las partículas que impactan contra el acero, las cuales se pueden denominar según la teoría establecida en el marco teórico página 23 y 24 donde se observa los tipos de desgaste abrasivo por fatiga y micro cortes, también se comparo con la investigación de Noelmar Pereira, Abbade Sergio João Crnkovic (2000) descrita en el estado del arte los cuales obtuvieron micrografías con el impacto de partículas angulares como se observa en la ilustración 42.

Se realiza un estudio a la superficie impactada por medio del microscopio electrónico de barrido con el fin de determinar la erosión ocasionada.

En la micrografía de la ilustración 42 a 500 aumentos se analiza la forma de la erosión causada por las partículas en las probetas ensayadas, se puede observar en los círculos que el desgaste es causado por fatiga y en el rectángulo también se puede apreciar microcortes en la micrografía de 1000 aumentos.

**Ilustración 42.** Micrografía 500 aumentos acero API 5L x56.

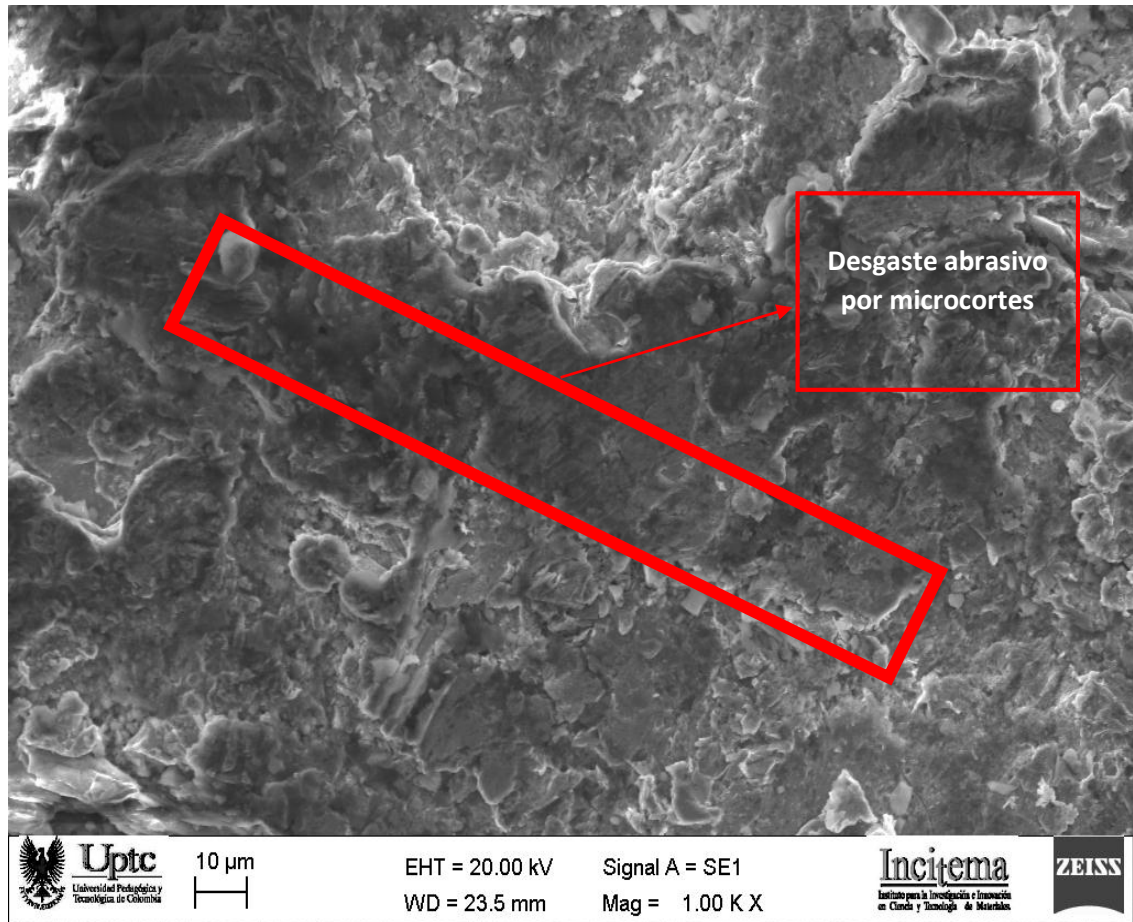


**Fuente:** Autor.



En la micrografía de la ilustración 43 a 1000 aumentos observamos con más claridad el pequeño microcorte presente en el acero, indicado en el rectángulo causada por partículas de forma redondeada, la cual tiene esta característica de abrasión por desgaste ya que según el teórico el movimiento de las partículas es por arrastre del material sólido particulado causando los ya nombrados microcortes.

**Ilustración 43.** Micrografía 1000 aumentos acero API 5L x56.

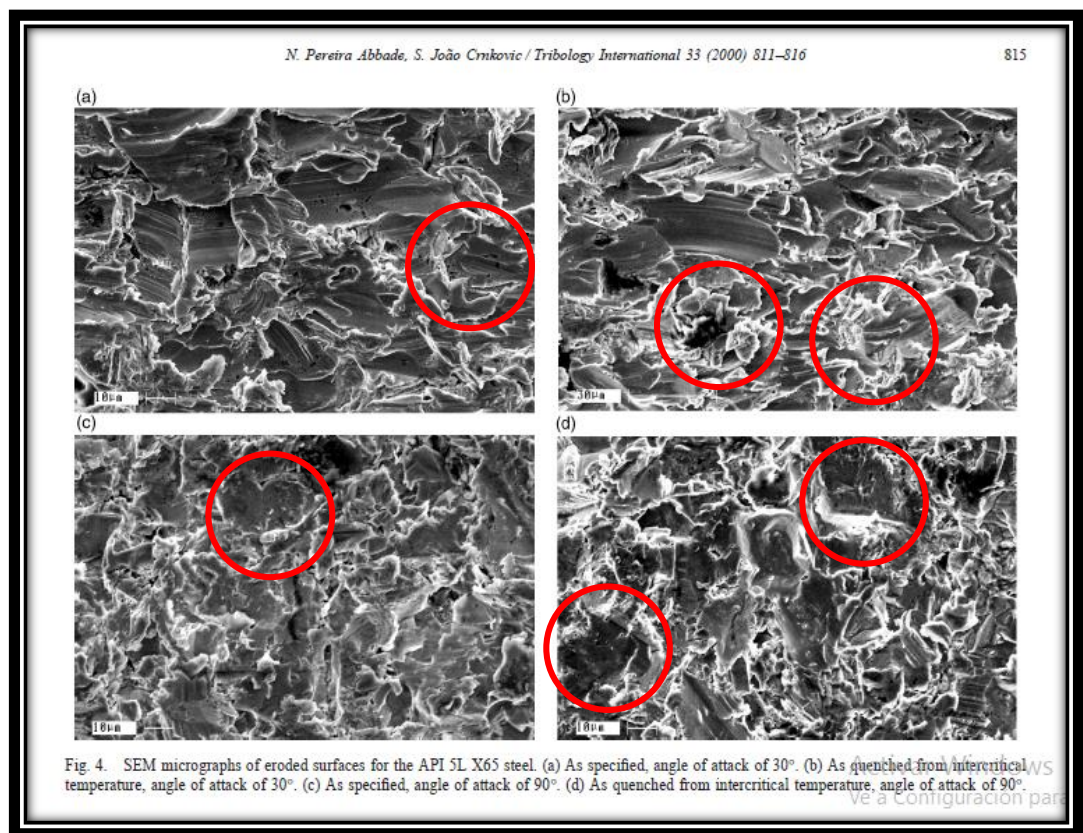


**Fuente:** Autor.

El material sólido particulado posee un efecto de desgaste abrasivo por fatiga como se puede evidenciar en la micrografía de 500 aumentos y desgaste por microcorte como se puede evidenciar en la micrografía de 1000 aumentos.

Según la teoría tomada por Noelmar Pereira, Abbade Sergio João Crnkovic (2000). El cual nos indica que las formas de crateres son característicos de la erosión formada por la fatiga ya que esta se da por el continuo impacto de partículas contra el acero, trabajaron con tamaños de partícula de 149 a 297 micras, como se puede apreciar en la ilustración 44 de las micrografías del acero API 5L x65 y en los círculos rojos se indican las constantes deformaciones por fatiga.

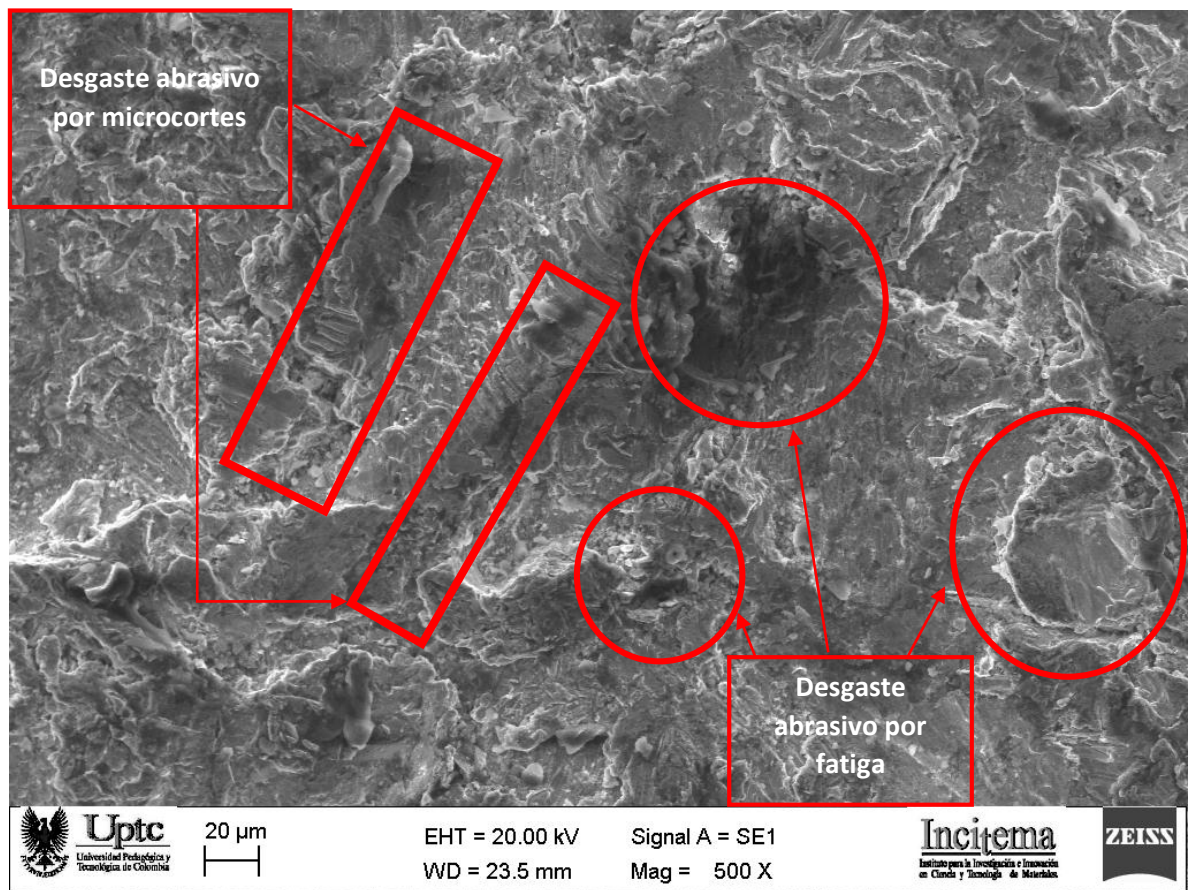
#### Ilustración 44. Micrografías del acero API 5L x65.



**Fuente:** Noelmar Pereira, Abbade Sergio João Crnkovic (2000)

En las siguientes micrográficas de las ilustraciones 45 a la 50 se pueden apreciar las formas de desgaste por microcortes y fatiga en diferentes probetas ensayadas.

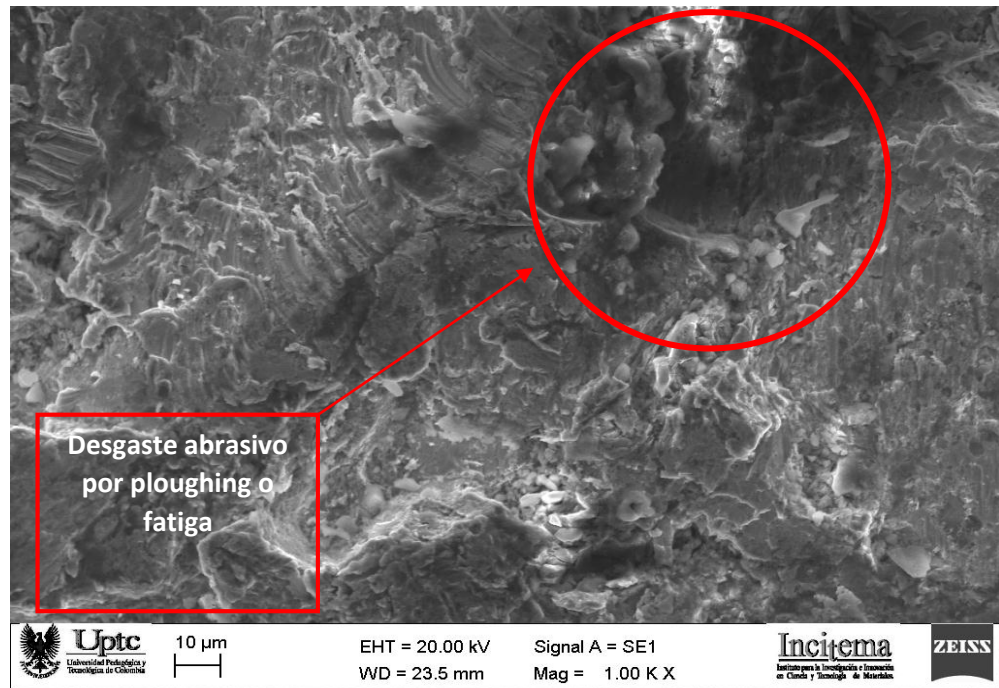
**Ilustración 45.** Micrografía a 500 aumentos acero API 5L x56.



**Fuente:** Autor.

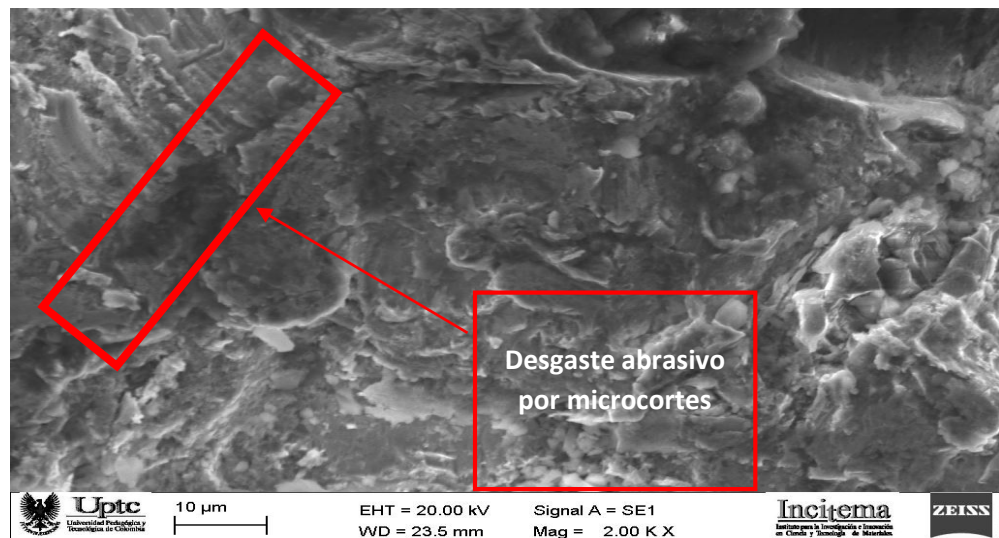


**Ilustración 46.** Micrografía a 1000 aumentos acero API 5L x56.



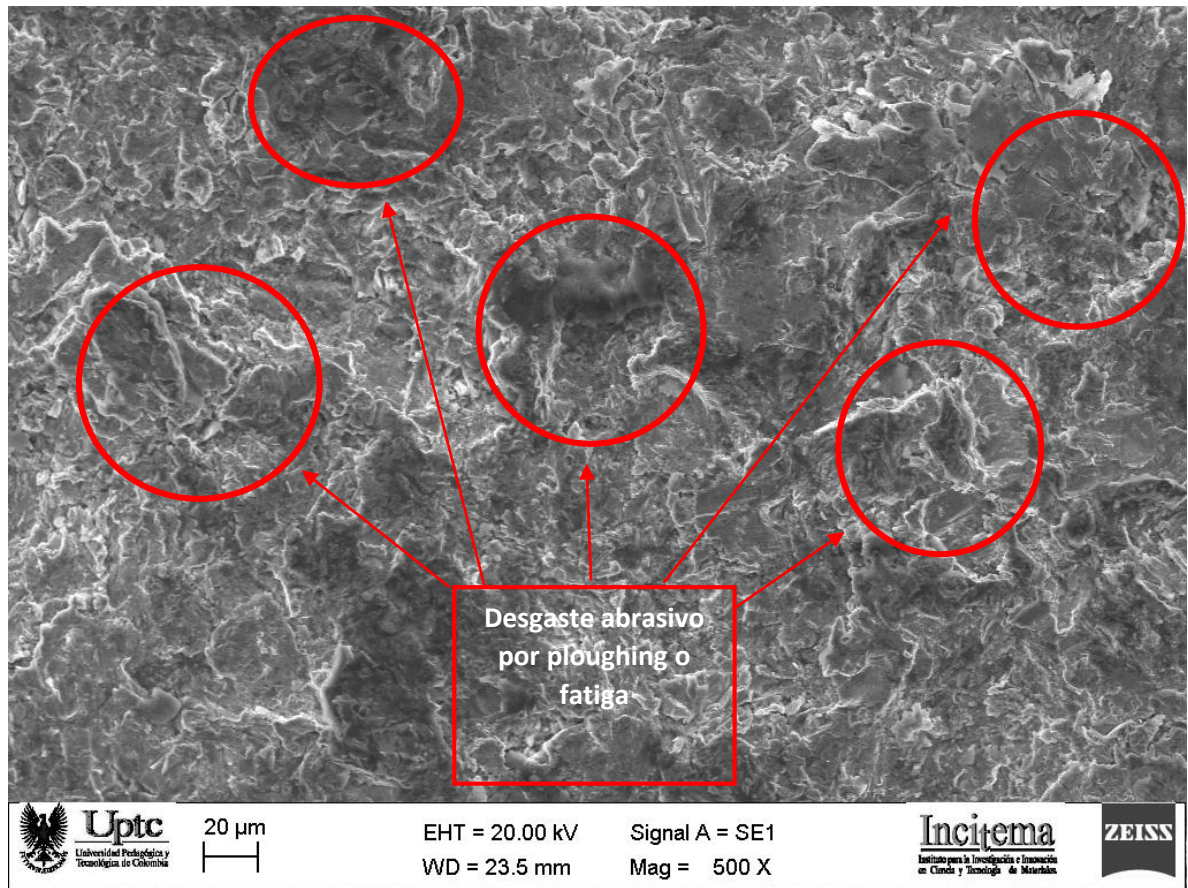
**Fuente:** Autor

**Ilustración 47.** Micrografía a 2000 aumentos acero API 5L x56.



**Fuente:** Autor

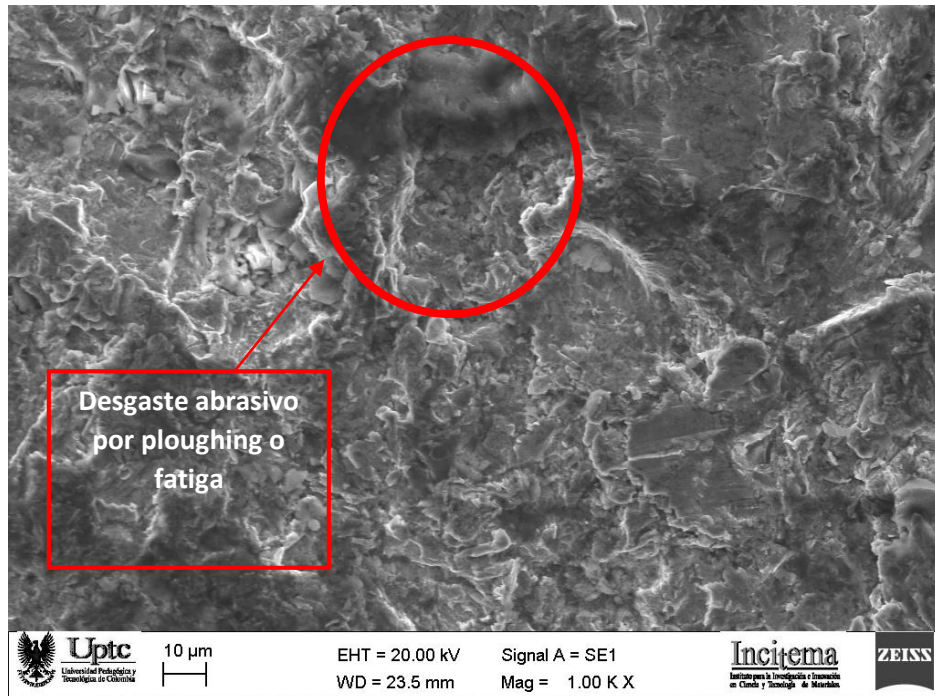
**Ilustración 48. .** Micrografía a 500 aumentos acero API 5L x56.



**Fuente:** Autor.

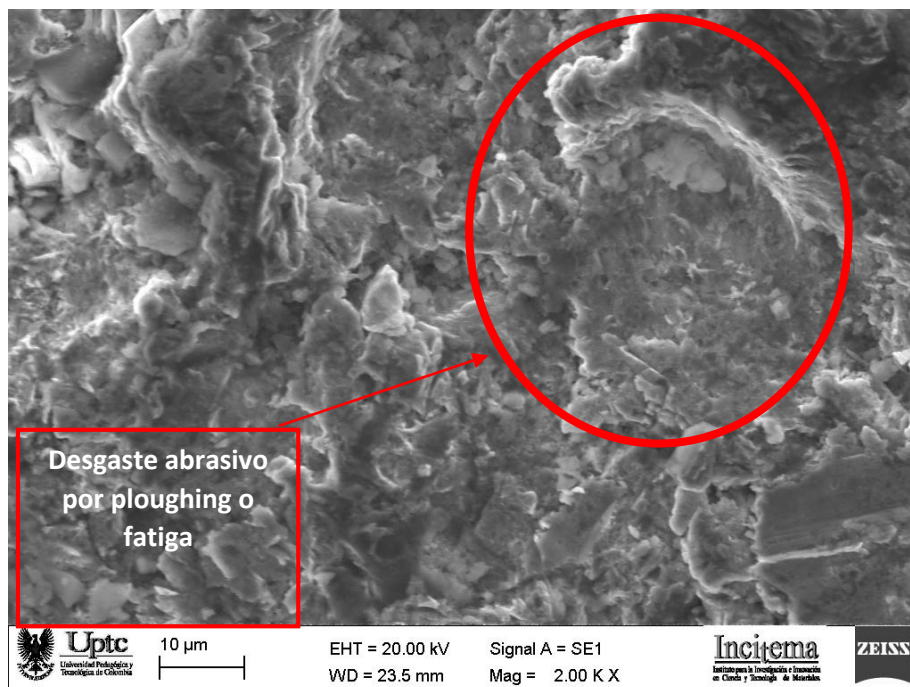


**Ilustración 49.** Micrografía a 1000 aumentos acero API 5L x56.



**Fuente:** Autor.

**Ilustración 50.** Micrografía a 2000 aumentos acero API 5L x56.



**Fuente:** Autor.

## 5 CONCLUSIONES

La caracterización química determinó la presencia de silicio en mayor cantidad seguido de aluminio, sodio y otros elementos en pequeñas cantidades. Para complementar este ensayo y determinar los compuestos de la muestra se realizó el ensayo de difracción, corroborando la presencia de silicio en mayor cantidad en el material sólido particulado. En base al resultado se logró la caracterización para catalogar las propiedades del silicio con respecto a la influencia en la erosión provocada en el acero.

Según los resultados obtenidos por el microscopio electrónico de barrido se determinó la morfología de las partículas dando una forma angular catalogada por una esfericidad de 0.7 y redondez de 0.3, presentando en su superficie drusas o maclas el efecto de erosión es causado por la forma de la partícula que provoca microcortes y cráteres por fatiga a el acero.

Según en la caracterización del material sólido particulado, el tamaño de las partículas está entre un rango de 0,595mm y 1.19mm determinado por ensayo de análisis granulométrico de muestras de suelos por tamizado ASTM D422, lo que según M.M stack afirma que las partículas de tamaño mayor a 0.1 mm no son influyentes en la velocidad de erosión ya que esta depende de otras variables como lo son velocidad de flujo (Caudal), Presión, Temperatura, tipo y características del fluido.

Del ensayo de la norma ASTM G65 se observó que el efecto del material sólido particulado en el acero API 5L x56 causa una perdida volumétrica promedio de 51.67 mm<sup>3</sup> con una pérdida de masa promedio de 0,41g. El acero sometido al ensayo se encuentra según la norma, calificado como tipo A, que son materiales de alta resistencia a la abrasión este se determina porque su pérdida volumétrica es inferior a los 100 mm<sup>3</sup>.

Se evaluó la huella causada por el material sólido particulado en el acero revelando el tipo de erosión, definiéndolo como desgaste por fatiga, evidenciado en las gráficas topográficas y por las micrografías en las cuales se determinaron la abrasión por cráteres ocasionado por las partículas angulares de la muestra del material sólido particulado.

El resultado de pH del material sólido particulado lavado y el material sólido particulado con crudo tiene una diferencia mínima 7.58 y 7.72, el ensayo se tomó como caracterización química del material definiendo que estos resultados no son de mayor relevancia en la caracterización de este, como se supuso al inicio del trabajo.

## **6 RECOMENDACIONES**

Al no estar estandarizado el procedimiento de lavado del material sólido particulado se realizó dos procedimientos de lavado uno por medio de limpieza con ultrasonido y el otro por una plancha con calentamiento y agitación. Se recomienda que se realice por medio de la limpieza de ultrasonido ya que por calentamiento en la plancha y agitación no mueve muestras más grandes de 50 gramos.

Para la separación de material sólido particulado del crudo y del solvente se recomienda estudiar y elegir un método de separación de mezclas distinto al utilizado en este proyecto basado en la decantación.

Con respecto al lavado con ultrasonido se recomienda utilizar un equipo que posea una variación de temperatura ya que a mayor temperatura disminuye la viscosidad del fluido y mejora el lavado evitando la presencia de orgánicos en la caracterización química.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MARISOL FARALDOS Y CONSUELO GOBERNA (eds.), Técnicas de análisis y caracterización de Materiales, 2.a ed. rev. y aum. CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS. MADRID, 2011.

AGUILAR SÁNCHEZ, JOSÉ RUBÉN. (2009). Tribology. Atlantic International University: Tesis de Doctorado.

M. EN I. FELIPE DÍAZ DEL CASTILLO RODRÍGUEZ. Tribología: Fricción, Desgaste y Lubricación. Cuautitlán Izcalli, 2007. Lectura de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Departamento de Ingeniería.

M. EN I. FELIPE DÍAZ DEL CASTILLO RODRÍGUEZ. Tribología: Fricción, Desgaste y Lubricación. Cuautitlán Izcalli, 2007. Lectura de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Departamento de Ingeniería. pag. 7-10.

RABINOWICZ, E. (1995). Friction and wear of materials. USA: John Wiley.

CHAVEZ MARTINEZ, FRANCISCO (2002). La tribología: Ciencia y Técnica para el Mantenimiento. México: Ed. Noriega Limusa 2da reimpresión.

ASTM G40-92 "Standard Terminology Relating to Wear and Erosion"

HUTCHINGS, I.M. (1992). Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. UK: Edward Arnold.

R.G. WELLMAN, AND C. ALLEN, Wear 186-187, 117-122 (1995).

RABINOWICZ, E. (1995). Friction and wear of materials. USA: John Wiley.

AMERICAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING, Recommended practice No. SNT-TC- 1A. Personal qualification and certification in nondestructive testing. Ed. Aug. 84, USA, columbus Oh., 1984.

CHRISTOPHER EARLS BRENNEN. "Fundamentals of multiphase flow" Primera edicion. Cambridge Universitypress. Cambrige, 2005.

MINGARRO MARTÍN, F. Y ORDÓÑEZ DELGADO, S. (1982) Petrología exógena. Hipergénesis y sedimentogénesis alóctona. Rueda. 403 págs. ISBN 84-7207-022-0 Pág. 196

SPECIFICATION FOR LINE PIPE, API Specification 5L Forty-Second, january 2000, pp. 37, 38.

ARANGO, ANDREA. Análisis Sismoestratigráfico de la Formación Carbonera Miembro C7. Magister en Ciencias – Geología. Bogotá, Colombia, 2014. Pag, 25-27.

Y. YANG, YF CHENG, desgaste, Volúmenes 276 - 277, 15 de febrero de 2012, Efectos paramétricos sobre la tasa de erosión-corrosión y el mecanismo de los tubos de acero al carbono en la lechada de arenas oleaginosas, Páginas 141-148.

X. TANG, LY XU, YF CHENG, Ciencia de la corrosión, Volumen 50, Número 5, mayo de 2008, Comportamiento de corrosión electroquímica del acero X - 65 en la suspensión de arena de aceite simulado, Páginas 1469-1474.

ARANGO, ANDREA. Análisis Sismoestratigráfico de la Formación Carbonera Miembro C7. Magister en Ciencias – Geología. Bogotá, Colombia, 2014.

NOELMAR PEREIRA, ABBADE SERGIO JOÃO CRNKOVIC, Tribología Internacional, Volumen 33, Número 12, diciembre de 2000, arena – agua en suspensión erosión de API 5L X65 tubería de acero como se inactivó desde temperatura crítica, Páginas 811-816.

AMIR MANSOURI, desgaste, Volúmenes 338 - 339, 15 de septiembre de 2015, Mejora del modelado CFD y validación de daños por erosión debidos a partículas de arena fina, Páginas 339-350.

KAI WANG, XIUFENG LI, YUESHE WANG, Renyang He, Tecnología del polvo, Volumen 314, 1 de junio de 2017, Investigación numérica del comportamiento de erosión en los codos de oleoductos, Páginas 490-499.

M.M. STACK G.H. ABDULRAHMAN, desgaste, Volúmenes 274 - 275, 27 de enero de 2012, Mapeo de la erosión - corrosión del acero al carbono en soluciones de petróleo - agua: Efectos de la velocidad y del potencial aplicado, Páginas 401-413.

R. HAMZAH, D.J. STEPHENSON, J.E. STRUTT, Erosion of material used in petroleum production, Wear, 186 (187) (1995), pp. 493–496.

M.M. STACK, G. ABDULRAHMAN, Mapping erosion–corrosion of carbon steel in oil exploration conditions: some new approaches to characterizing mechanisms and Synergies, Tribol. Int., 43 (7) (2010), pp. 1268–1277.

MAZDAK PARSI, KAMYAR NAJMI, Diario de Ciencia e Ingeniería de Gas Natural, Volumen 21, noviembre de 2014, Una revisión integral del modelado de la erosión de partículas sólidas para pozos de petróleo y gas y aplicaciones de tuberías, Páginas 850-873.

ASTM D5369-93. 2003. Standard practice for extraction of solid waste samples for chemical analysis using soxhlet extraction. Environmental Assessment, Book of Standards, Vol. 11.04, September 2004.

ASTM D422 - 63(2007) e2 "Standard Test Method for Particle-Size Analysis".

CARMEN ORALIA MELÉNDEZ. espectrometría de fluorescencia de rayos x. facultad de ciencias químicas/universidad autónoma de chihuahua, marzo 2009.

L. REIMER. ED. SPRINGER. Scanning Electron Microscopy: Physics Of Image Formation And Microanalysis. 1998.

BERMUDEZ POLONIO, J. Métodos de Difracción de Rayos X. Principios y aplicaciones. Ed. Piramide. Madrid. (1981).

M. FRÍAS, M. P. Espectrometría de difracción por rayos laser. Serrano Galvache, s/n. 28033 Madrid/España.

ASTM D422 - 63(2007) e2 "Standard Test Method for Particle-Size Analysis".

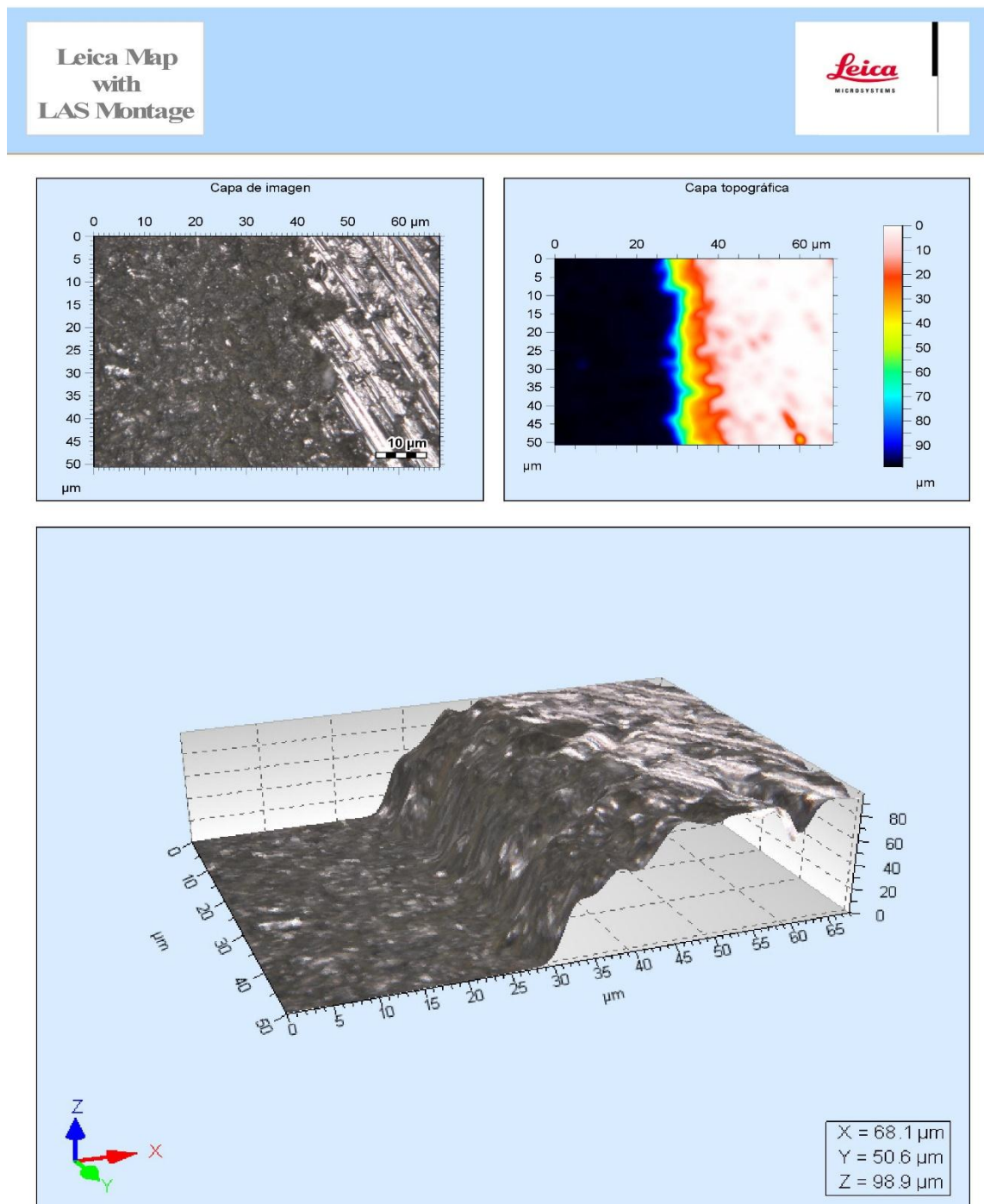
ASTM G65, Standard Practice for Conducting Dry Sand/Rubber Wheel Abrasion Test.

ASTM D 2487, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)

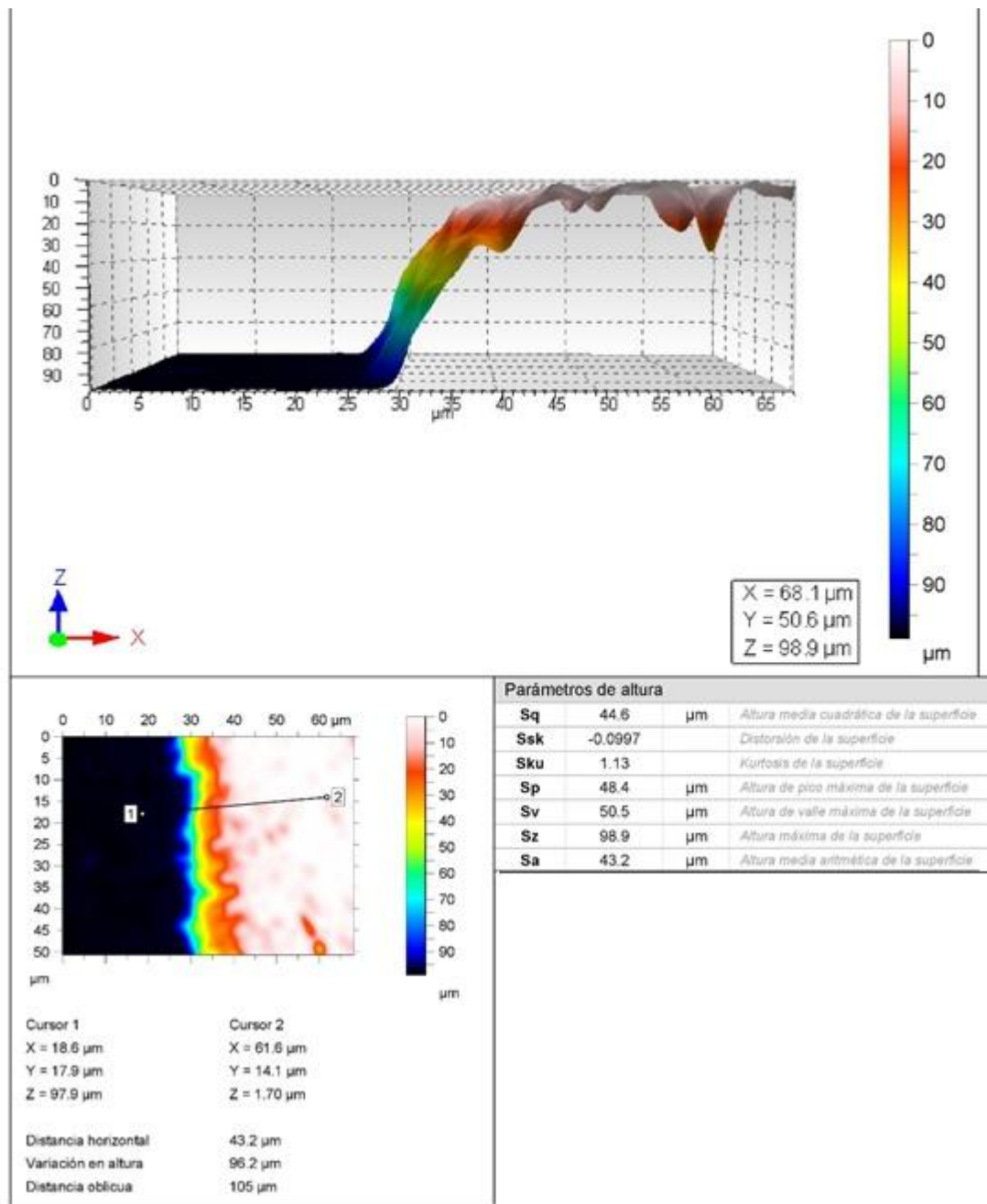
I.N.V. E – 104 – 07, Procedimientos para la preparación de muestras de suelos por cuarteo.

## ANEXOS

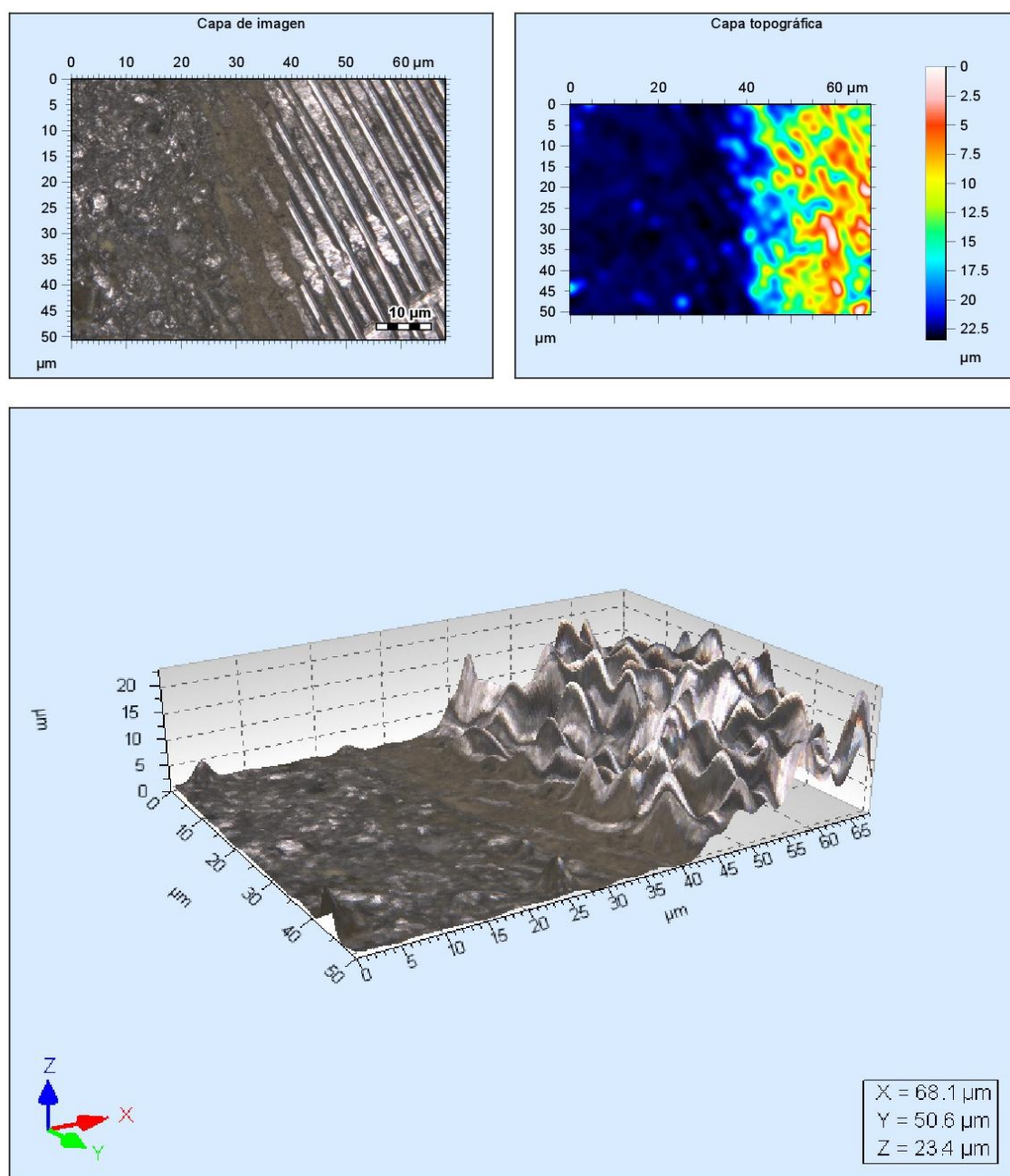
### Anexo 1. Mapeo topográfico probeta número 1.

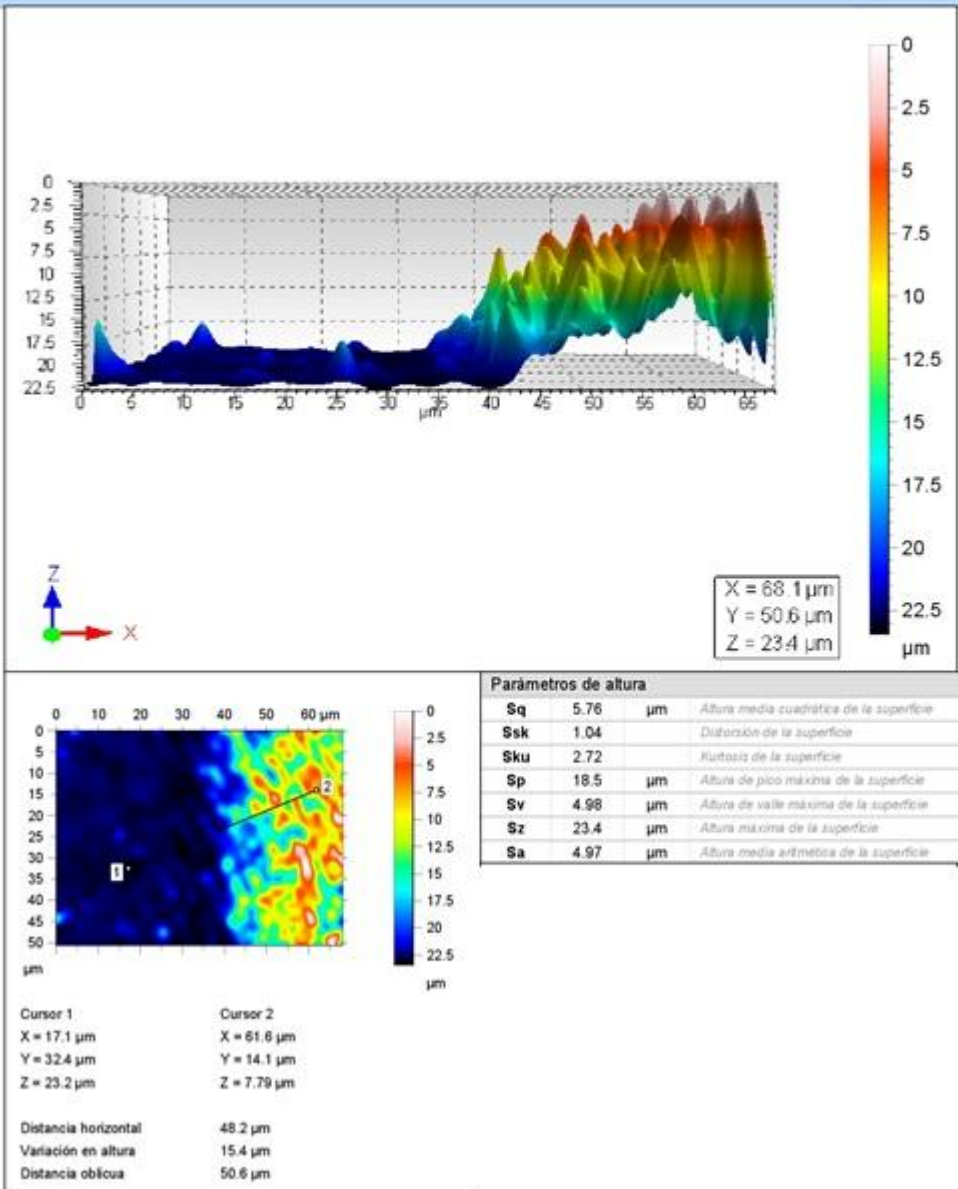




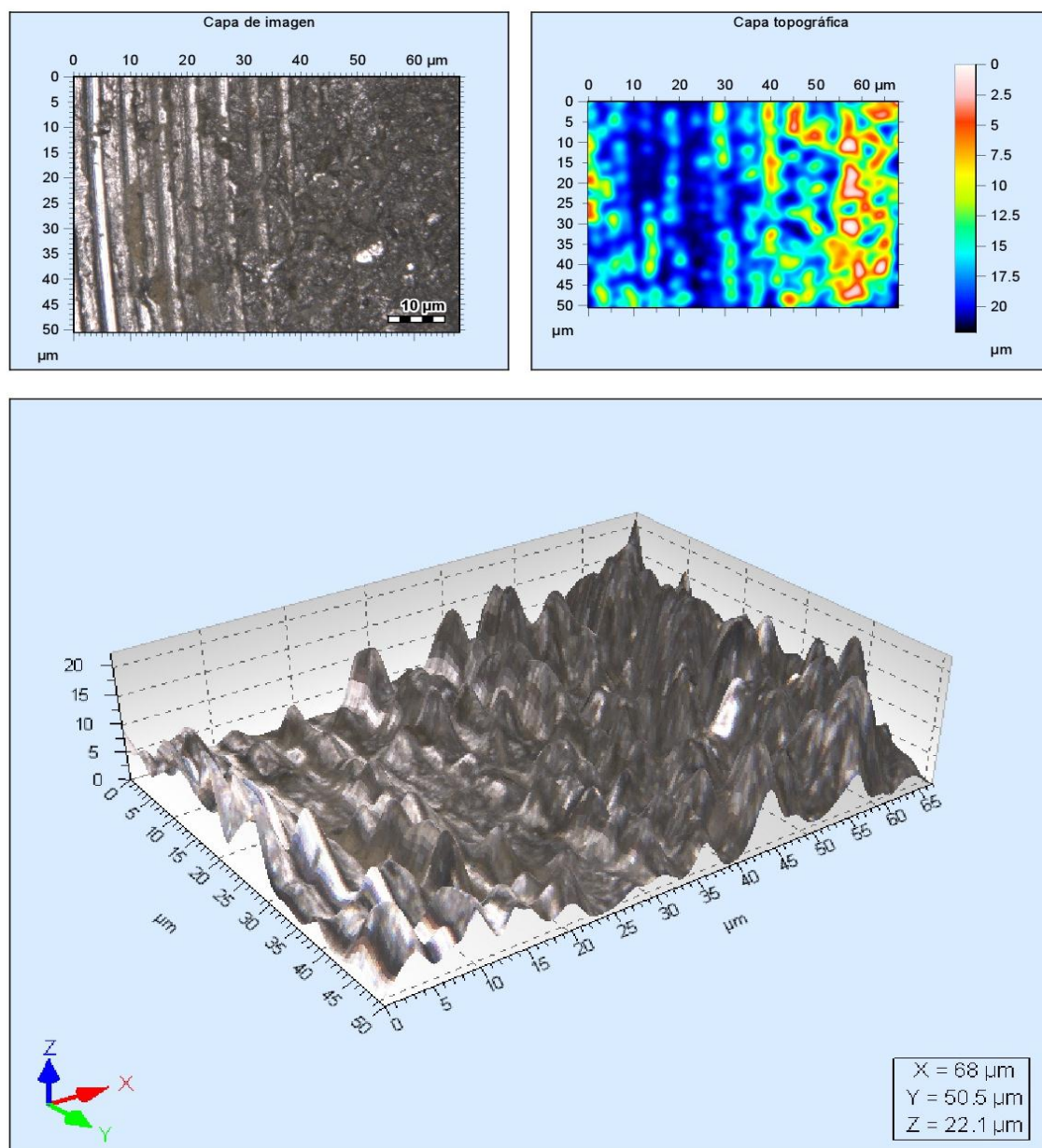


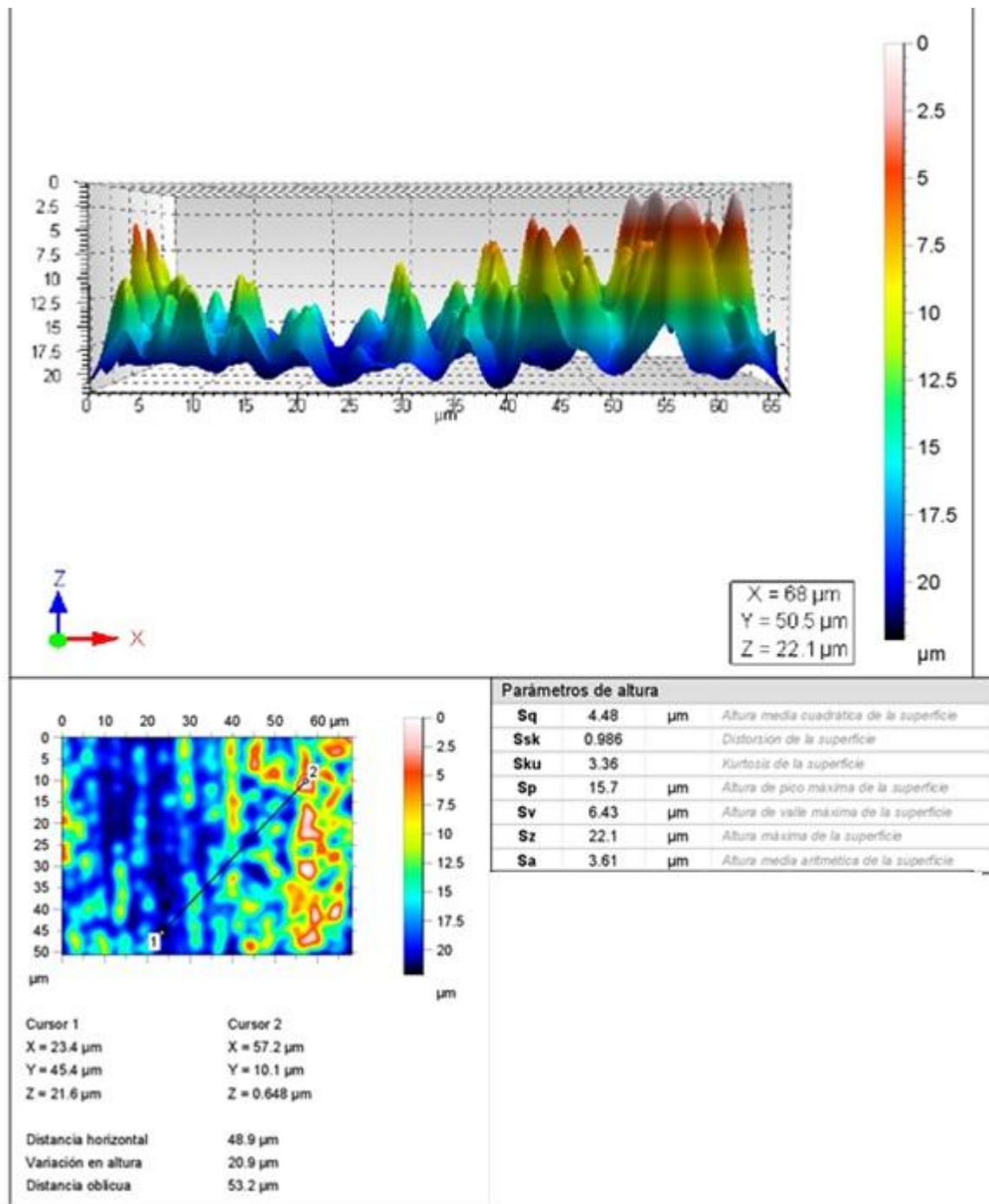
## Anexo 2. Mapeo topográfico probeta número 2.





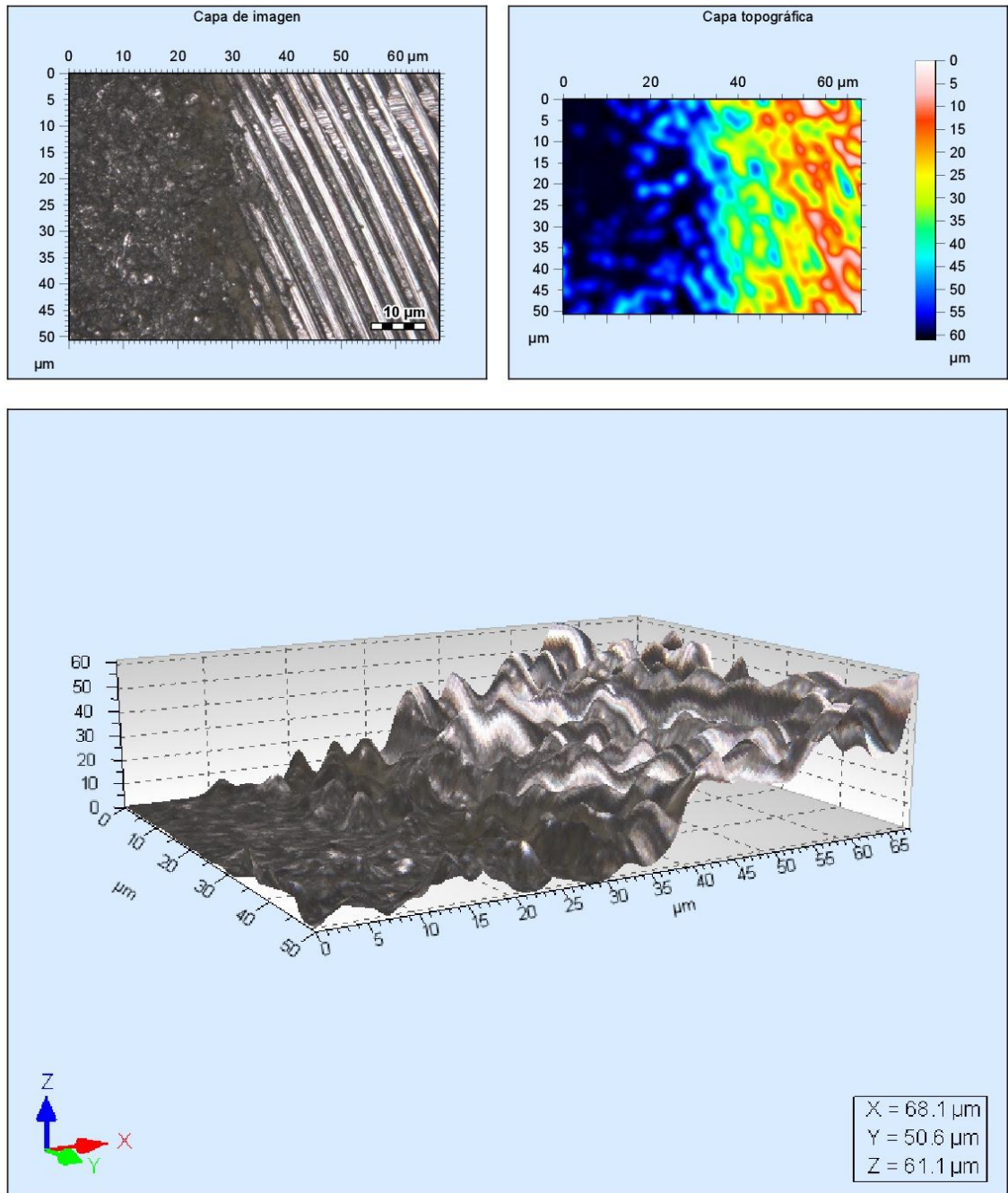
### Anexo 3. Mapeo topográfico probeta número 3.

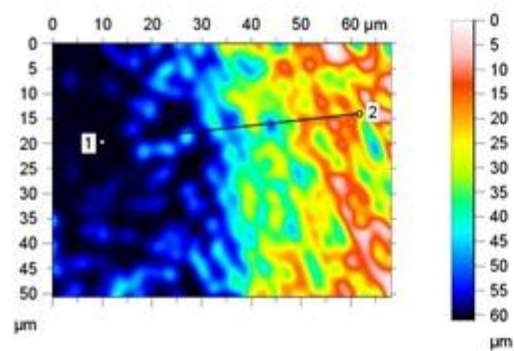
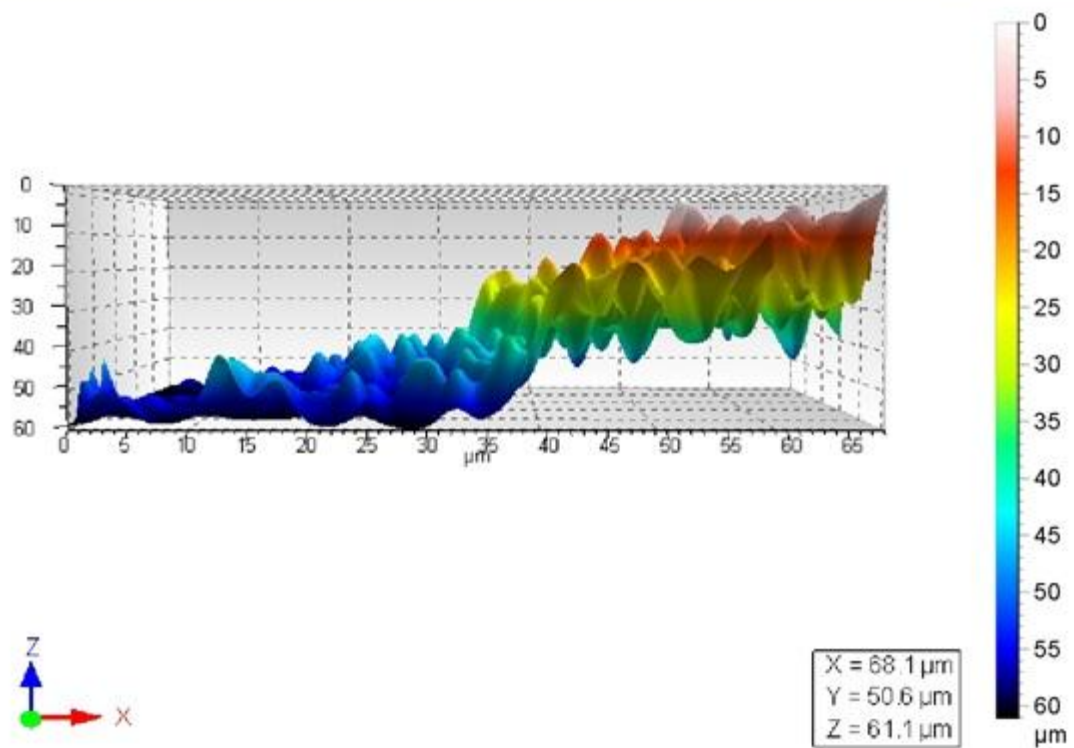






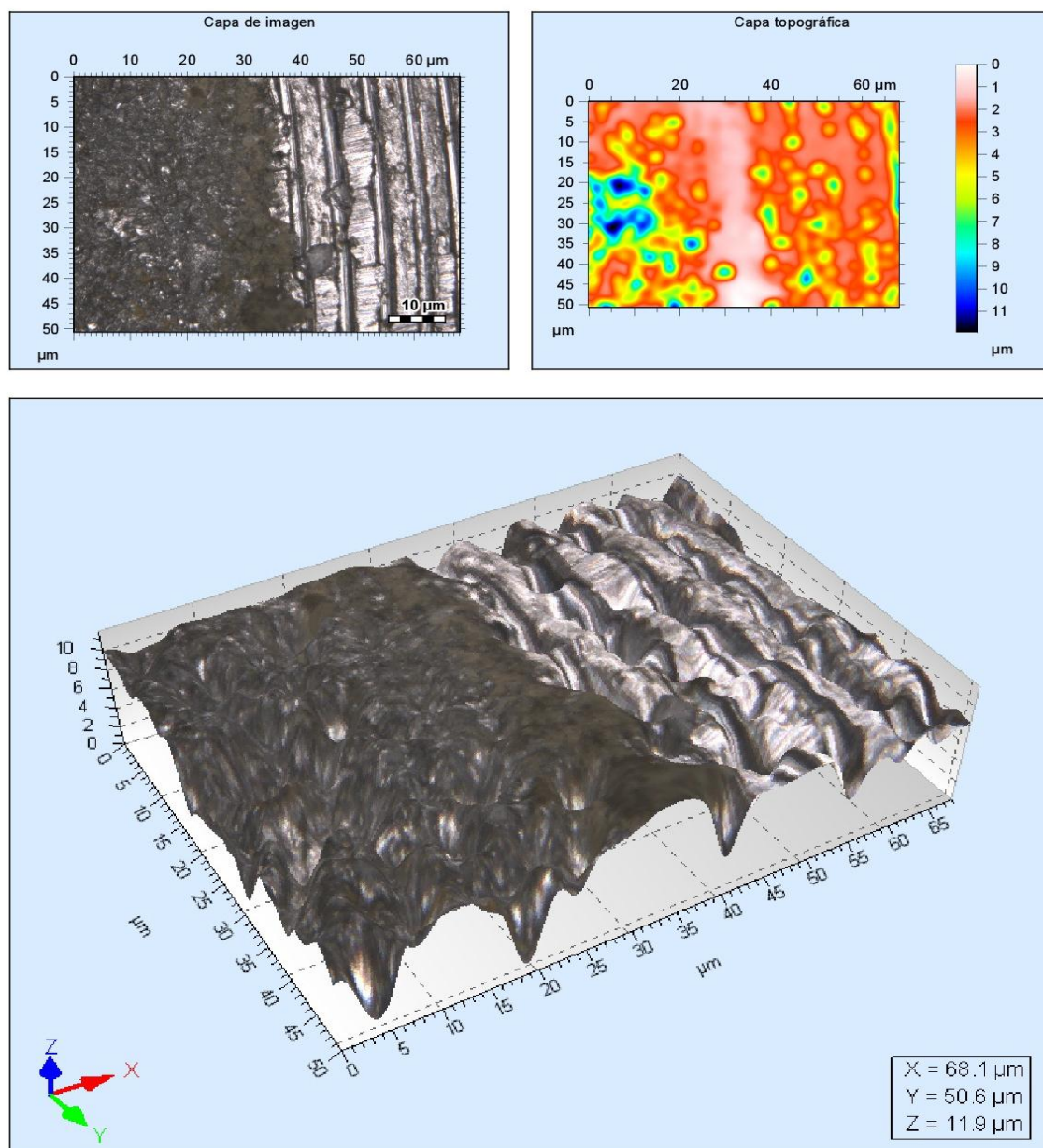
#### Anexo 4. Mapeo topográfico probeta número 4.



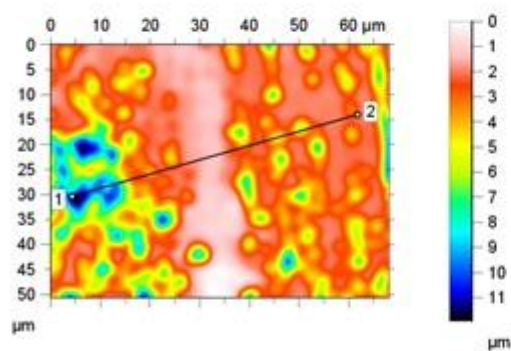
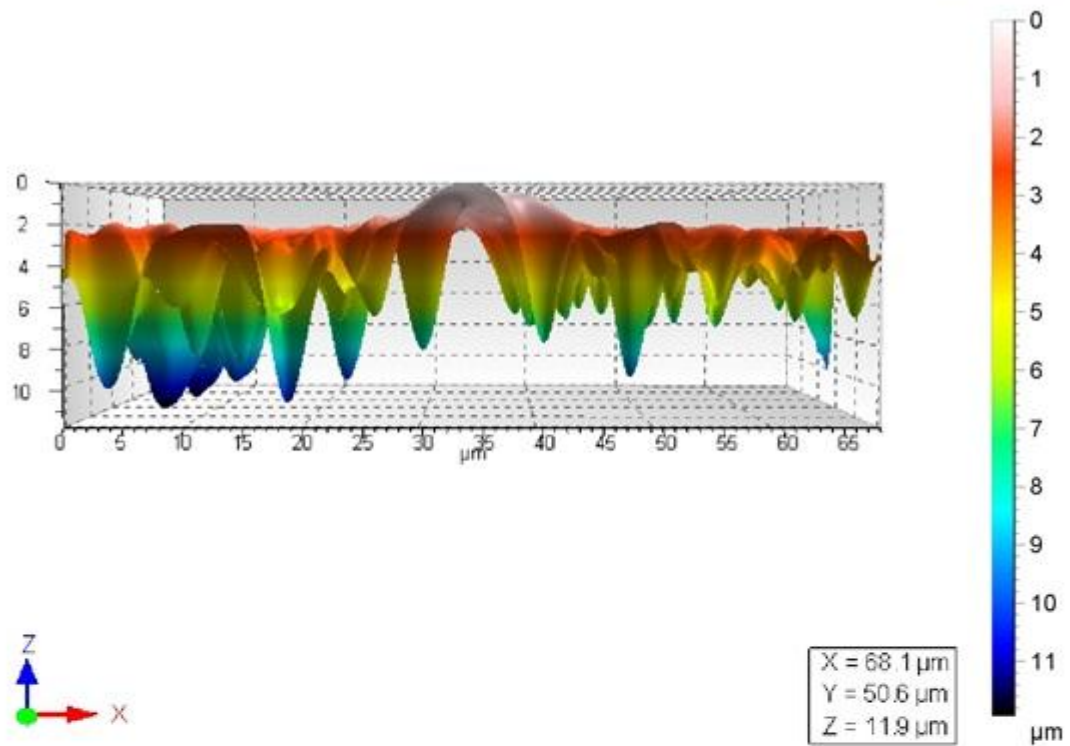


Parámetros de altura			
<b>Sq</b>	16.8	$\mu\text{m}$	Altura media cuadrática de la superficie
<b>Ssk</b>	0.498		Distorsión de la superficie
<b>Sku</b>	1.87		Kurtosis de la superficie
<b>Sp</b>	42.4	$\mu\text{m}$	Altura de pico máxima de la superficie
<b>Sv</b>	18.7	$\mu\text{m}$	Altura de valle máxima de la superficie
<b>Sz</b>	61.1	$\mu\text{m}$	Altura máxima de la superficie
<b>Sa</b>	15.0	$\mu\text{m}$	Altura media aritmética de la superficie

## Anexo 5. Mapeo topográfico probeta número 5.





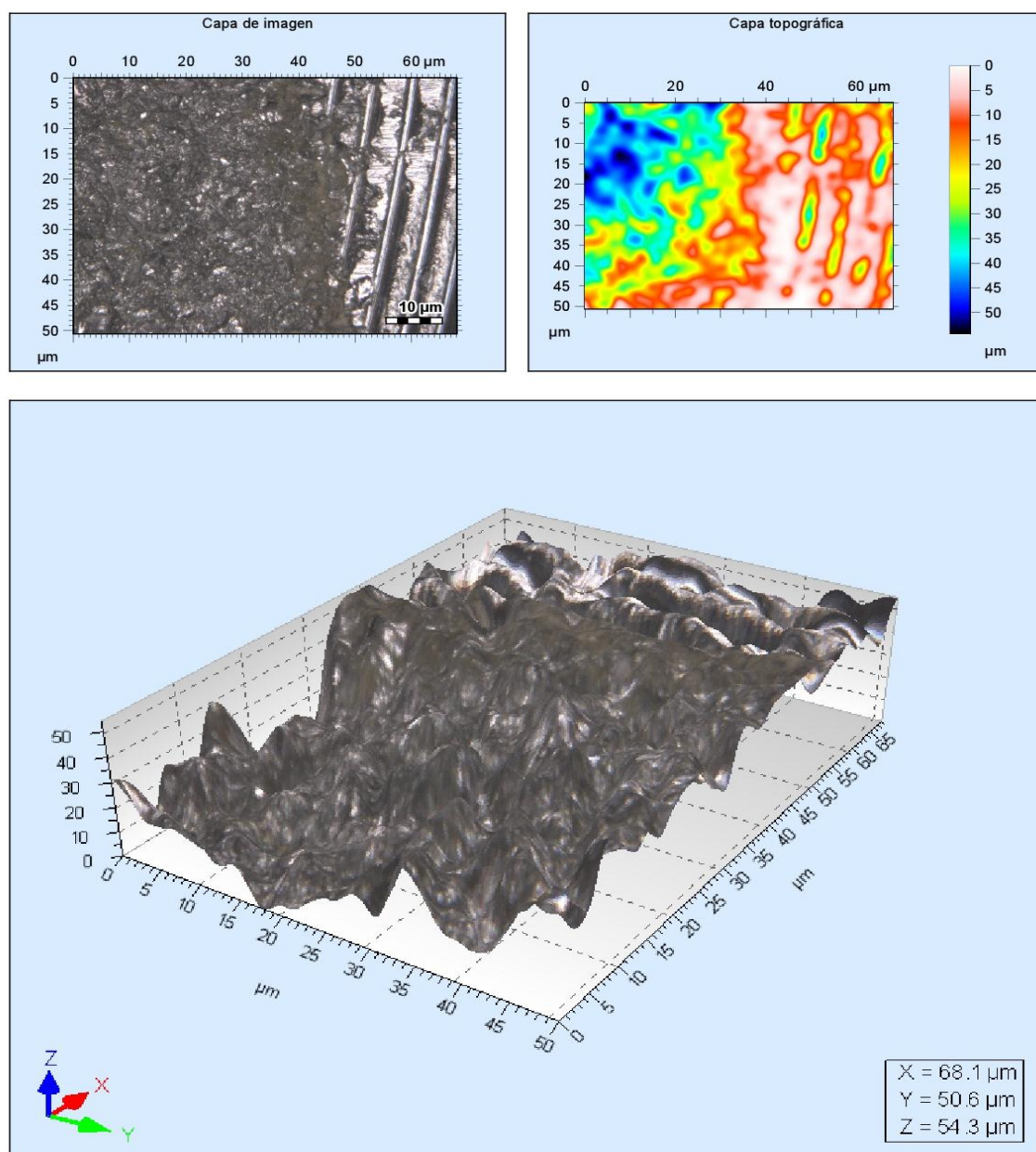


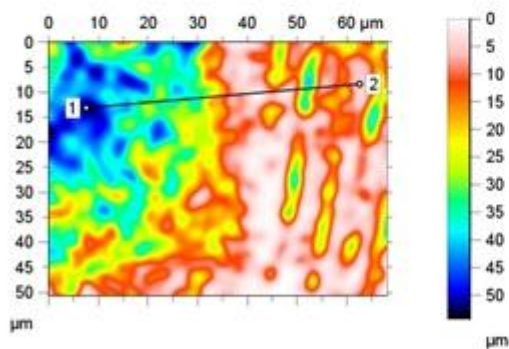
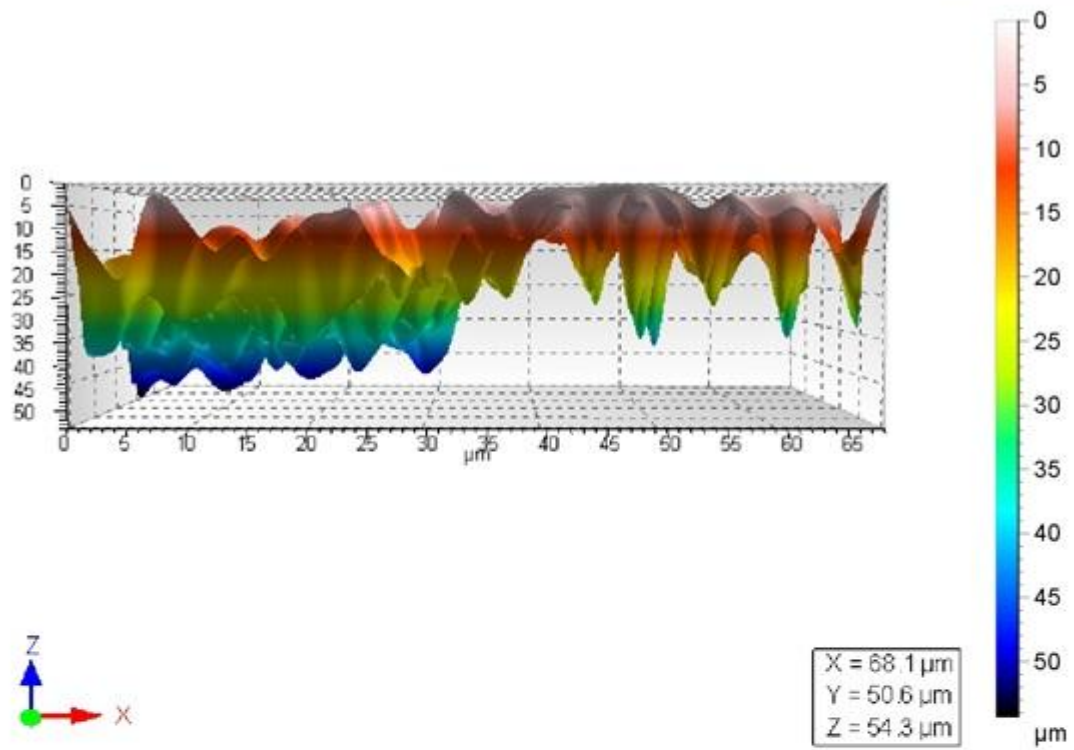
Cursor 1	Cursor 2
X = 4.19 $\mu\text{m}$	X = 61.6 $\mu\text{m}$
Y = 30.3 $\mu\text{m}$	Y = 14.1 $\mu\text{m}$
Z = 10.7 $\mu\text{m}$	Z = 2.39 $\mu\text{m}$
Distancia horizontal	59.7 $\mu\text{m}$
Variación en altura	8.33 $\mu\text{m}$
Distancia oblicua	60.3 $\mu\text{m}$

#### Parámetros de altura

<b>Sq</b>	1.95	$\mu\text{m}$	Altura media cuadrática de la superficie
<b>Ssk</b>	-1.42		Distorsión de la superficie
<b>Sku</b>	5.01		Kurtosis de la superficie
<b>Sp</b>	3.36	$\mu\text{m}$	Altura de pico máxima de la superficie
<b>Sv</b>	8.57	$\mu\text{m}$	Altura de valle máxima de la superficie
<b>Sz</b>	11.9	$\mu\text{m}$	Altura máxima de la superficie
<b>Sa</b>	1.48	$\mu\text{m}$	Altura media aritmética de la superficie

## Anexo 6. Mapeo topográfico probeta número 6.



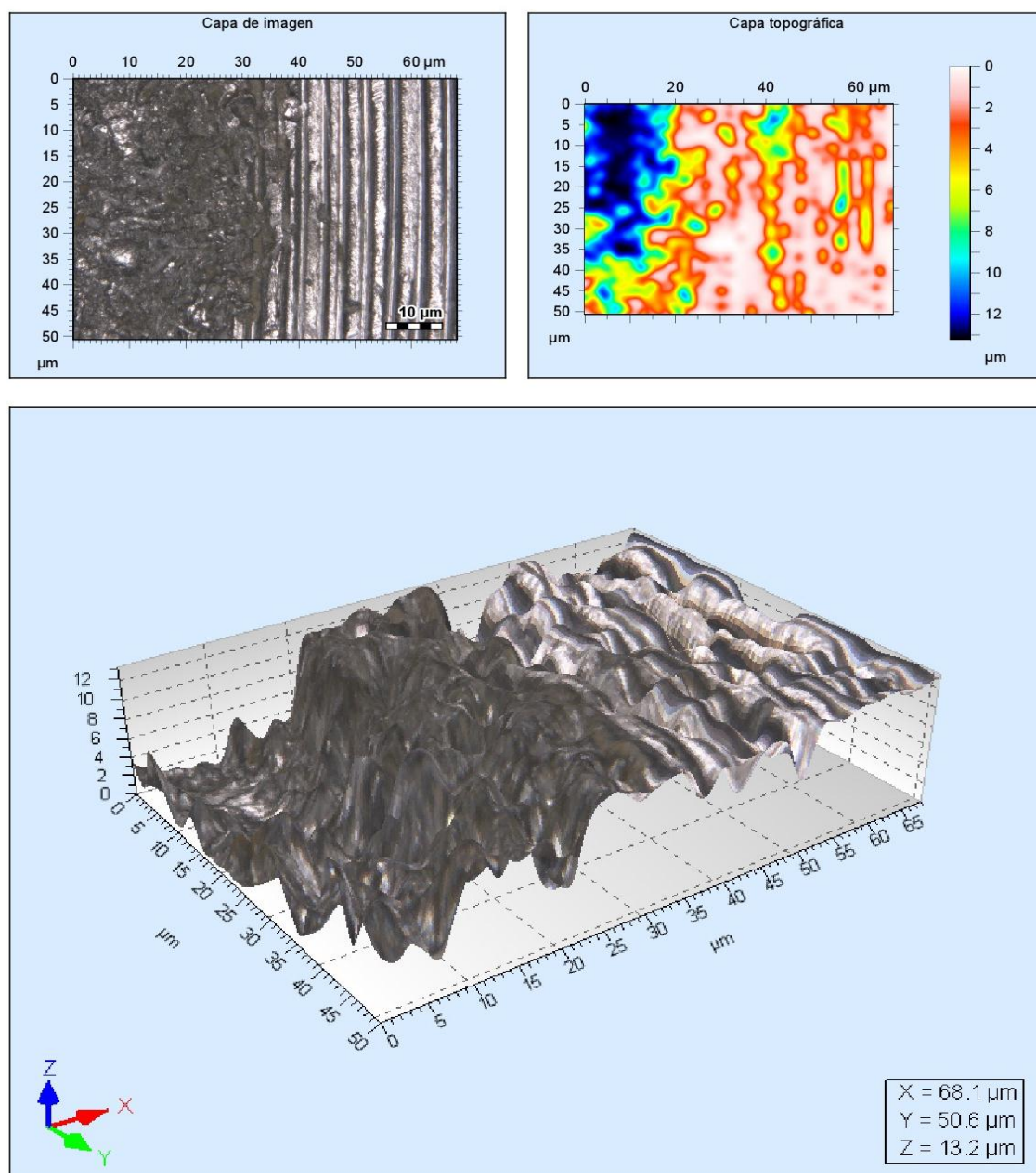


Cursor 1	Cursor 2
X = 7.51 $\mu\text{m}$	X = 62.6 $\mu\text{m}$
Y = 13.1 $\mu\text{m}$	Y = 8.34 $\mu\text{m}$
Z = 53.1 $\mu\text{m}$	Z = 5.49 $\mu\text{m}$
Distancia horizontal	55.4 $\mu\text{m}$
Variación en altura	47.6 $\mu\text{m}$
Distancia oblicua	73.0 $\mu\text{m}$

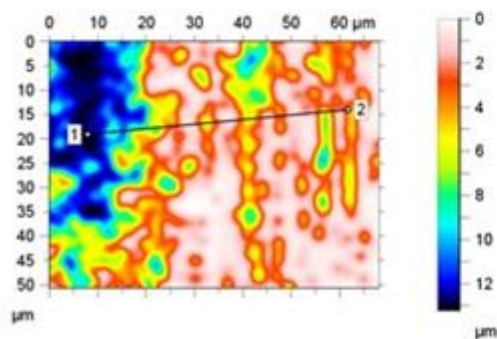
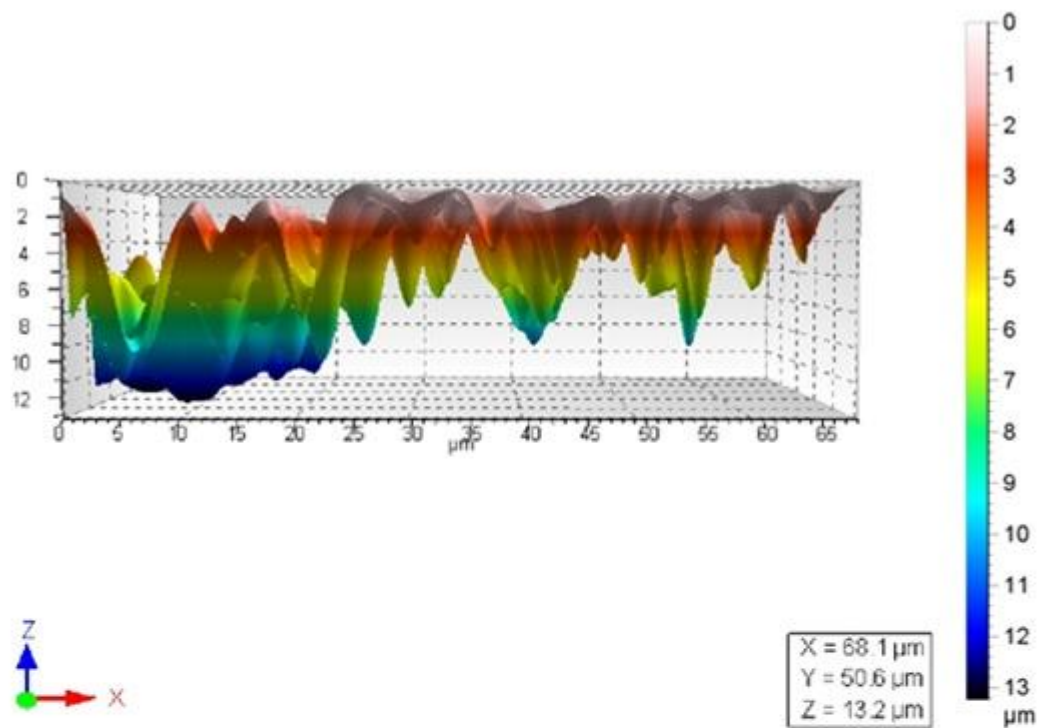
#### Parámetros de altura

<b>Sq</b>	13.6	$\mu\text{m}$	Altura media cuadrática de la superficie
<b>Ssk</b>	-0.484		Distorsión de la superficie
<b>Sku</b>	2.06		Kurtosis de la superficie
<b>Sp</b>	19.7	$\mu\text{m}$	Altura de pico máxima de la superficie
<b>Sv</b>	34.7	$\mu\text{m}$	Altura de valle máxima de la superficie
<b>Sz</b>	54.3	$\mu\text{m}$	Altura máxima de la superficie
<b>Sa</b>	11.8	$\mu\text{m}$	Altura media aritmética de la superficie

## Anexo 7. Mapeo topográfico probeta número 7.



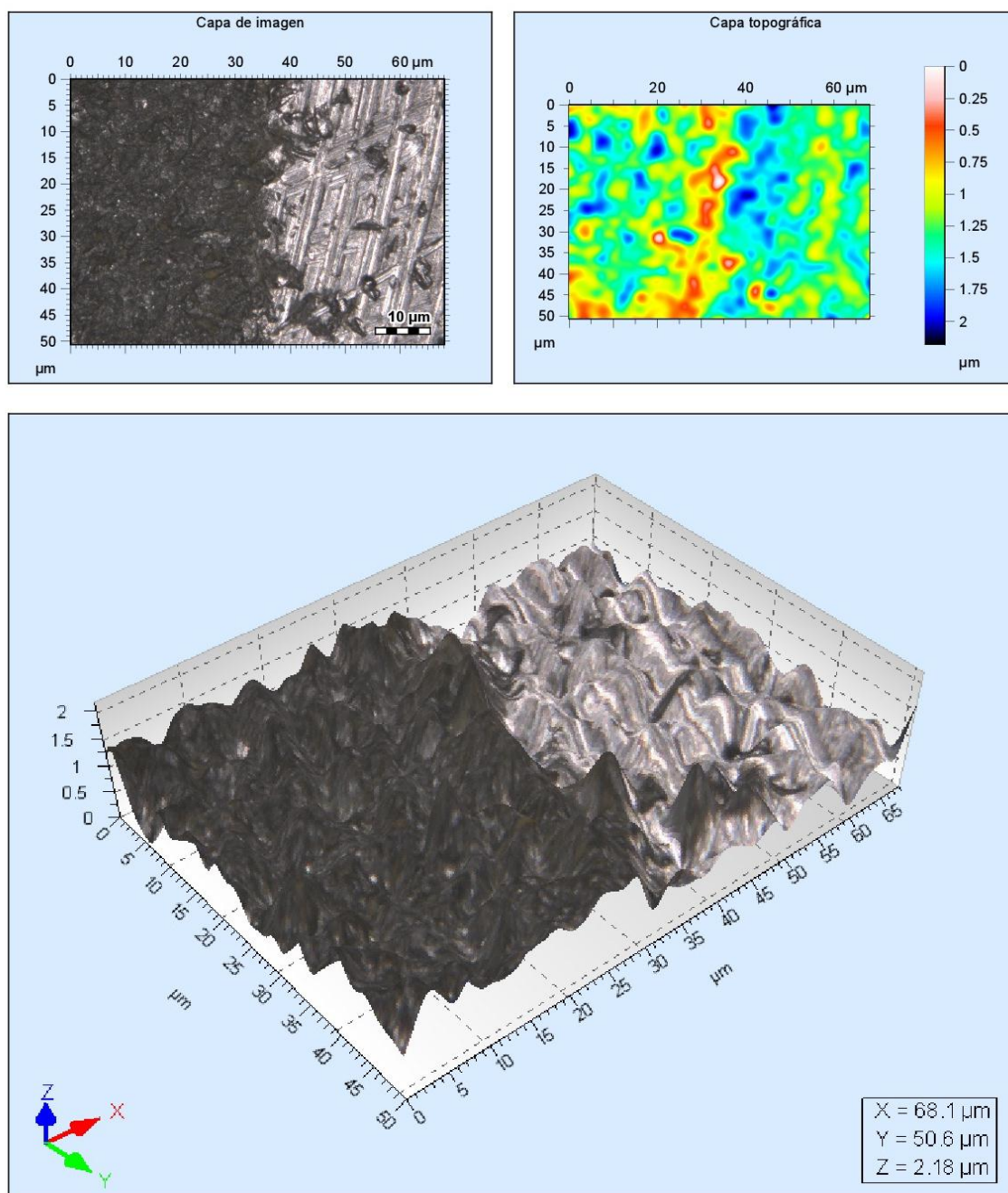


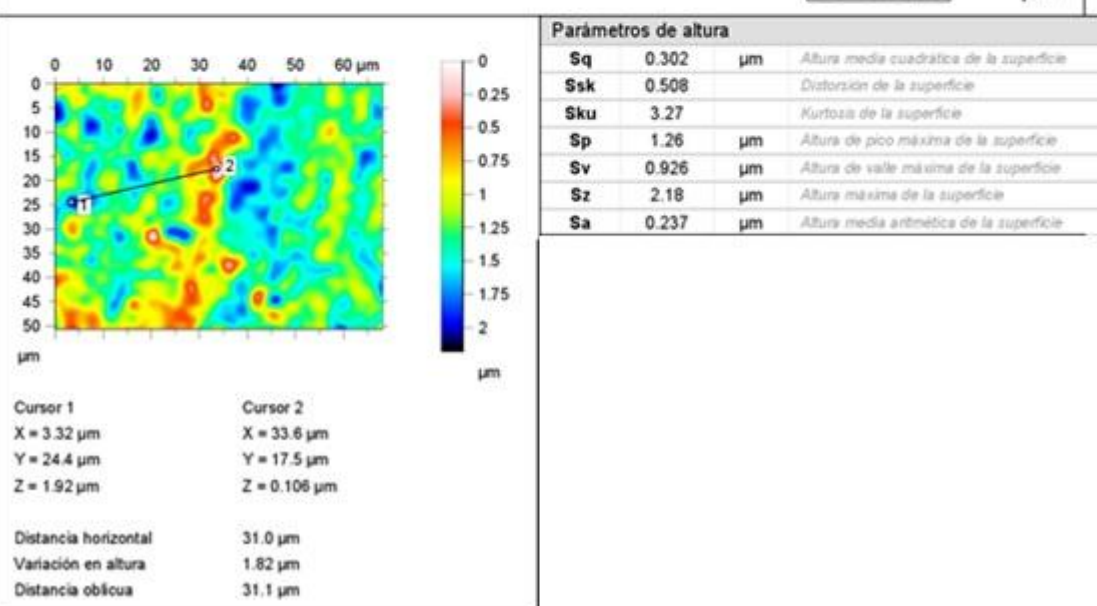
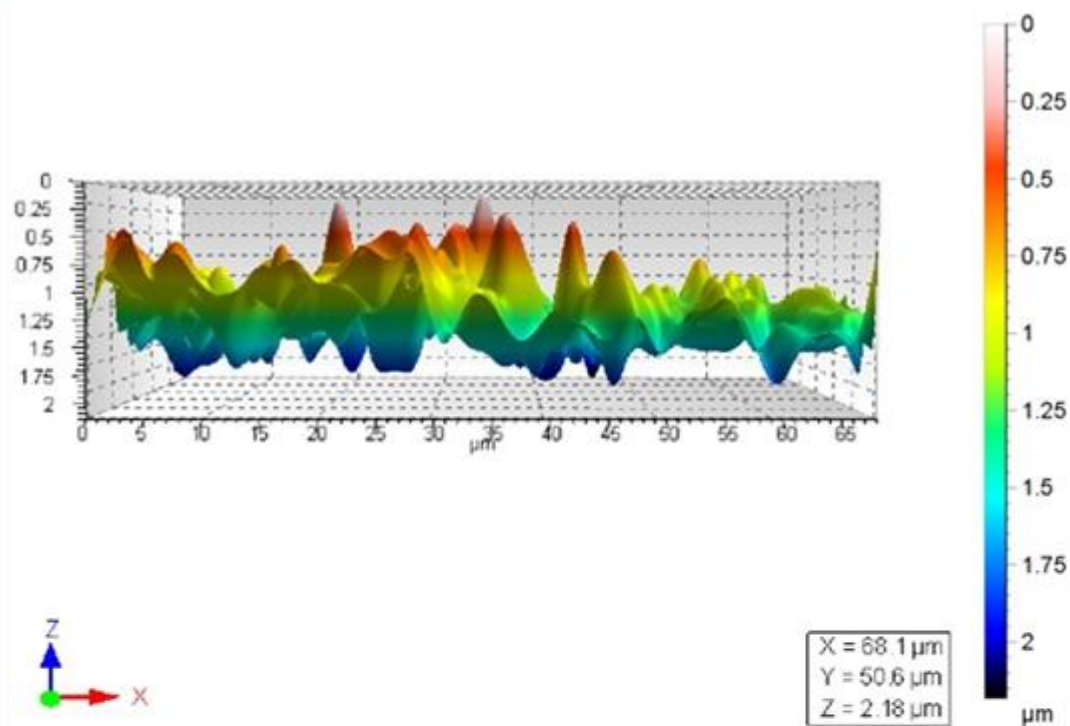


Cursor 1	Cursor 2
$X = 7.81 \mu\text{m}$	$X = 61.6 \mu\text{m}$
$Y = 19.0 \mu\text{m}$	$Y = 14.1 \mu\text{m}$
$Z = 12.9 \mu\text{m}$	$Z = 3.68 \mu\text{m}$
Distancia horizontal	$54.0 \mu\text{m}$
Variación en altura	$9.18 \mu\text{m}$
Distancia oblicua	$54.8 \mu\text{m}$

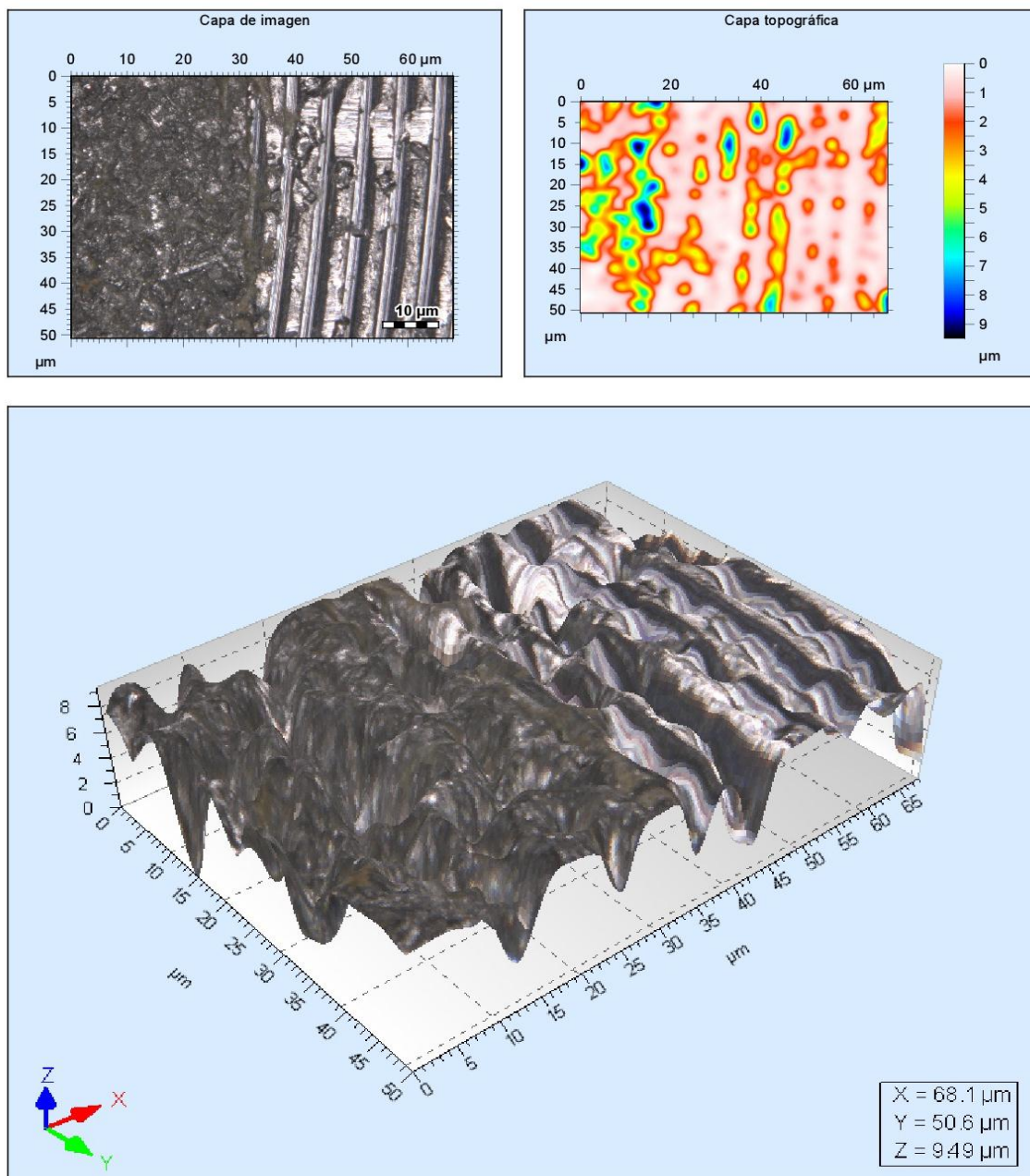
Parámetros de altura			
<b>Sq</b>	3.85	$\mu\text{m}$	Altura media cuadrática de la superficie
<b>Ssk</b>	-0.958		Distorsión de la superficie
<b>Sku</b>	2.63		Kurtosis de la superficie
<b>Sp</b>	4.41	$\mu\text{m}$	Altura de pico máxima de la superficie
<b>Sv</b>	8.82	$\mu\text{m}$	Altura de valle máxima de la superficie
<b>Sz</b>	13.2	$\mu\text{m}$	Altura máxima de la superficie
<b>Sa</b>	3.19	$\mu\text{m}$	Altura media aritmética de la superficie

## Anexo 8. Mapeo topográfico probeta número 8.

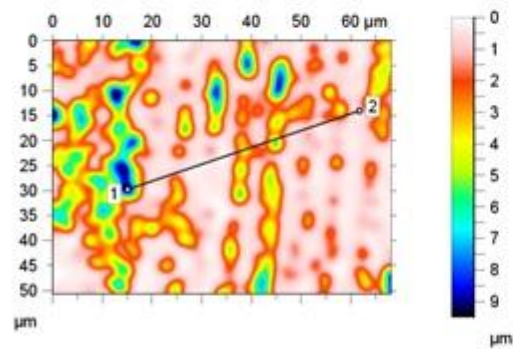
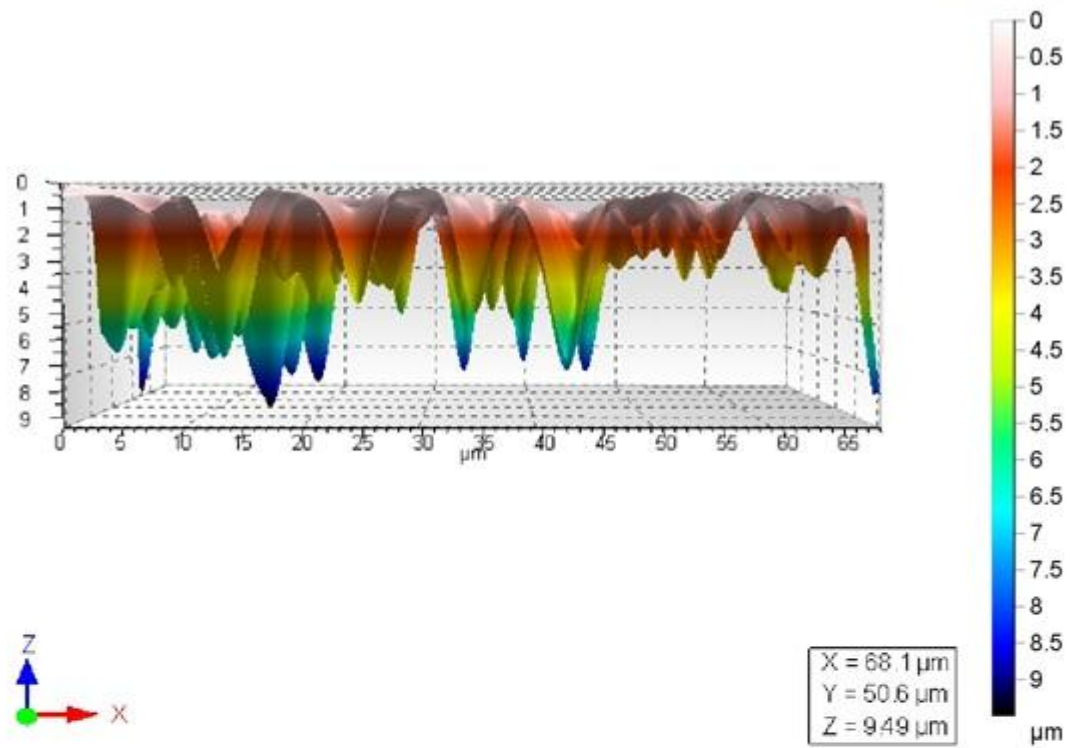




## Anexo 9. Mapeo topográfico probeta número 9.





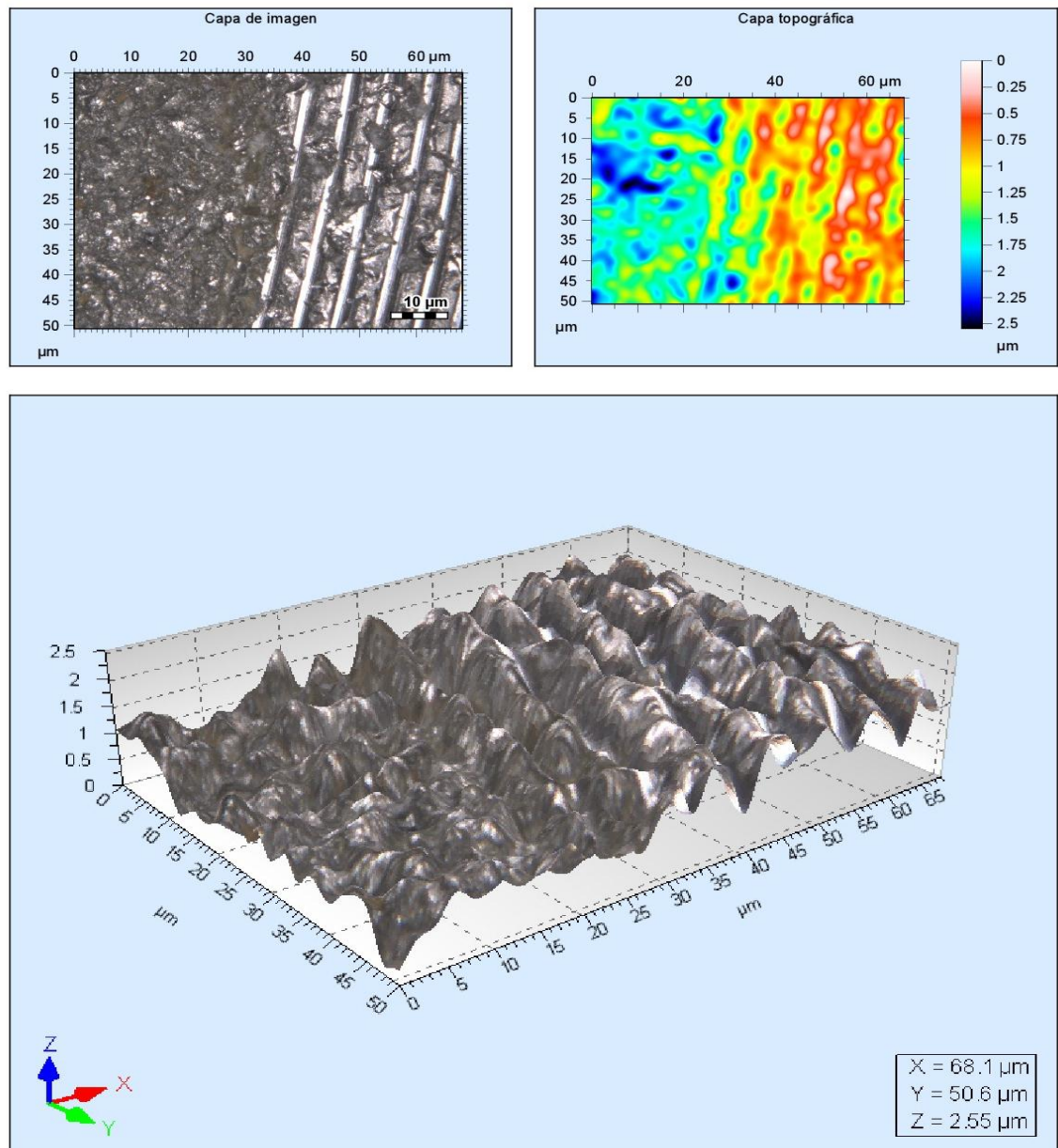


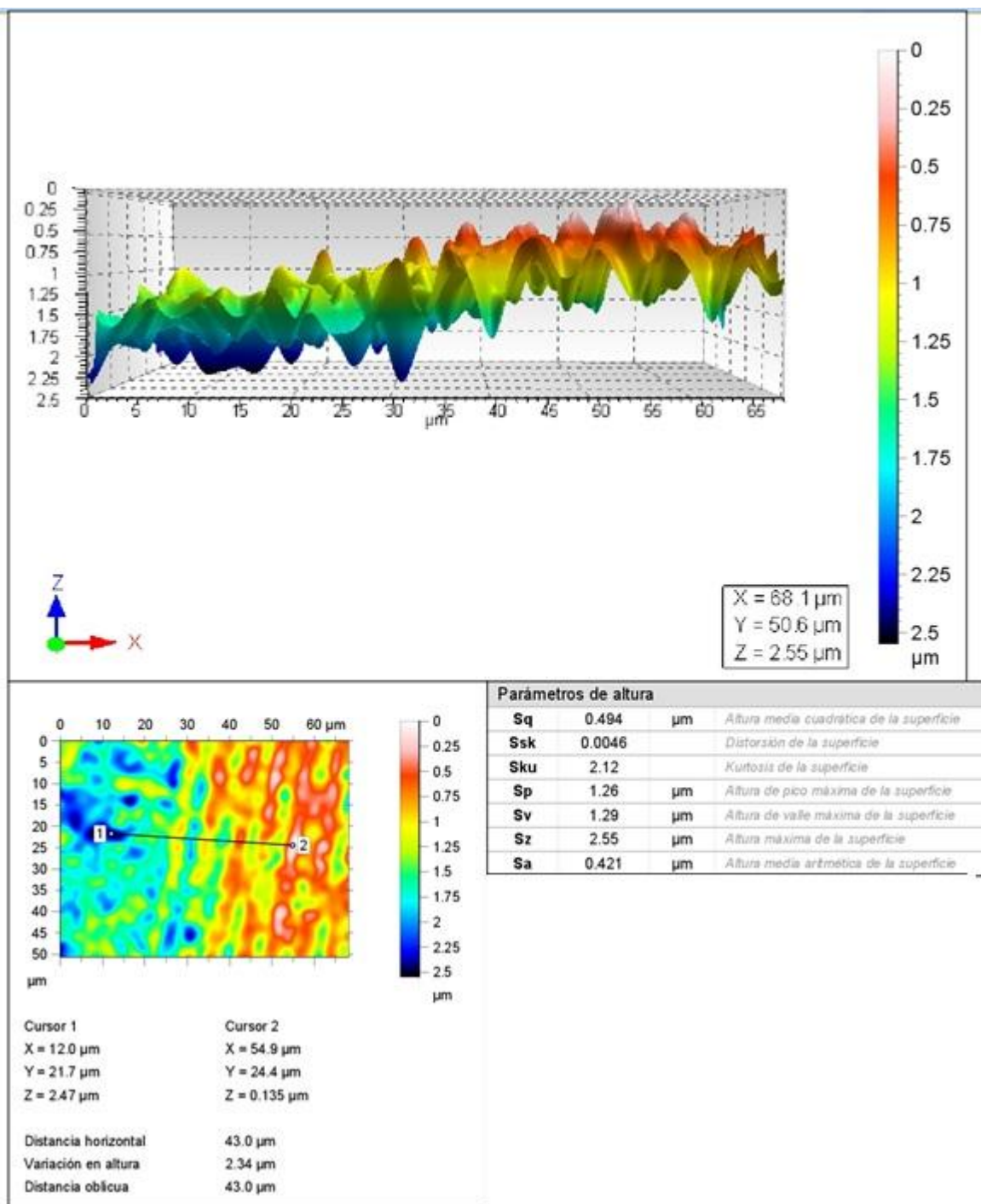
Cursor 1	Cursor 2
$X = 15.0 \mu\text{m}$	$X = 61.6 \mu\text{m}$
$Y = 29.8 \mu\text{m}$	$Y = 14.1 \mu\text{m}$
$Z = 9.38 \mu\text{m}$	$Z = 0.591 \mu\text{m}$
Distancia horizontal	49.2 $\mu\text{m}$
Variación en altura	8.79 $\mu\text{m}$
Distancia oblicua	50.0 $\mu\text{m}$

#### Parámetros de altura

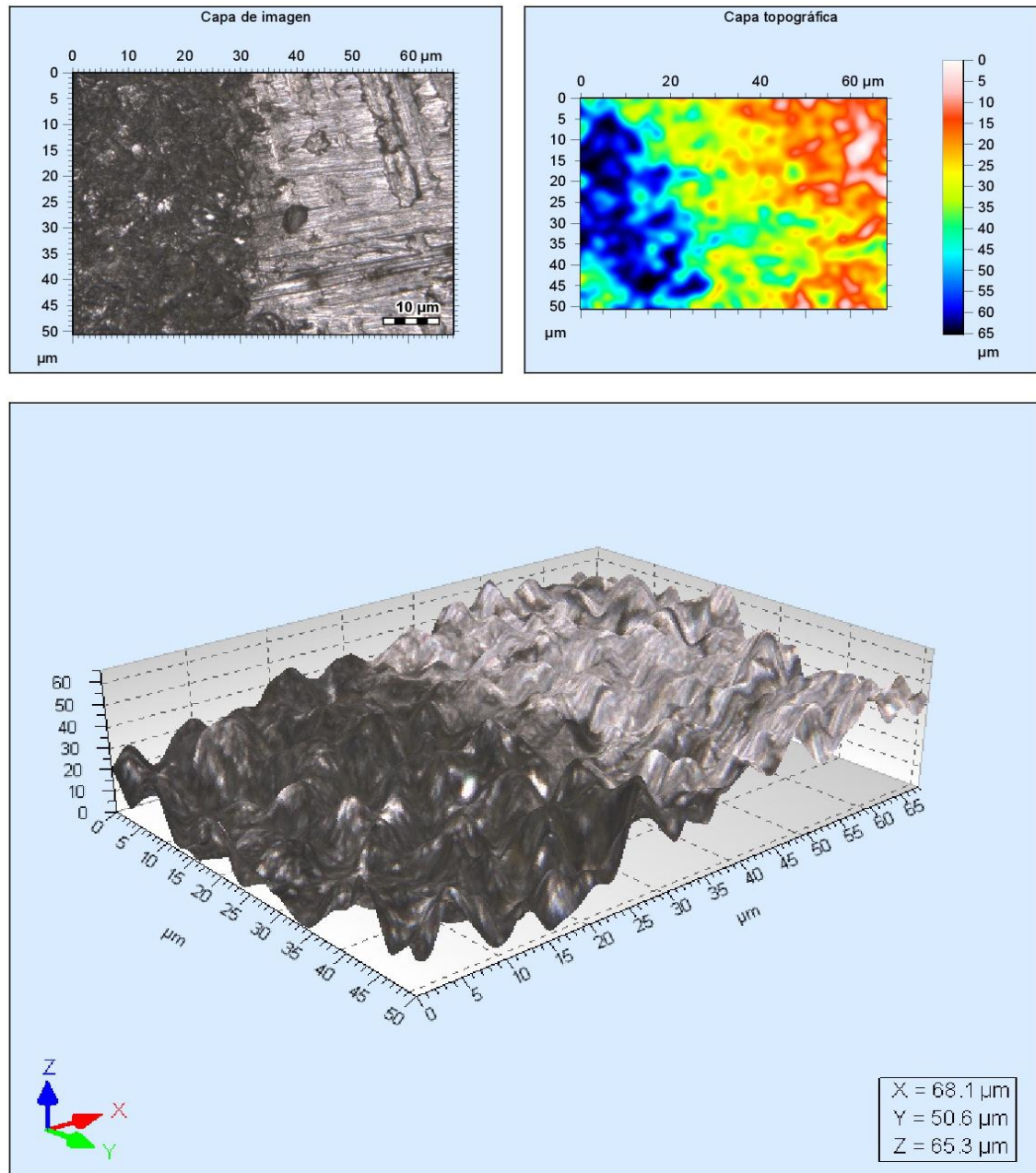
<b>Sq</b>	1.69	$\mu\text{m}$	Altura media cuadrática de la superficie
<b>Ssk</b>	-1.57		Distorsión de la superficie
<b>Sku</b>	5.31		Kurtosis de la superficie
<b>Sp</b>	1.87	$\mu\text{m}$	Altura de pico máxima de la superficie
<b>Sv</b>	7.62	$\mu\text{m}$	Altura de valle máxima de la superficie
<b>Sz</b>	9.49	$\mu\text{m}$	Altura máxima de la superficie
<b>Sa</b>	1.31	$\mu\text{m}$	Altura media aritmética de la superficie

## Anexo 10. Mapeo topográfico probeta número 10.

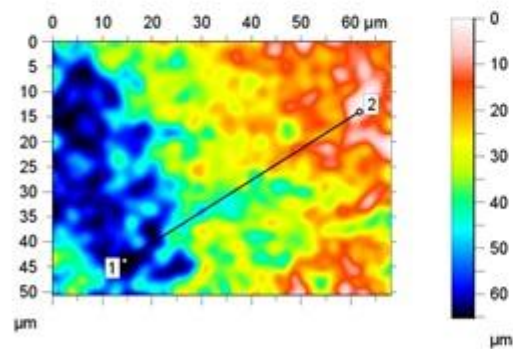
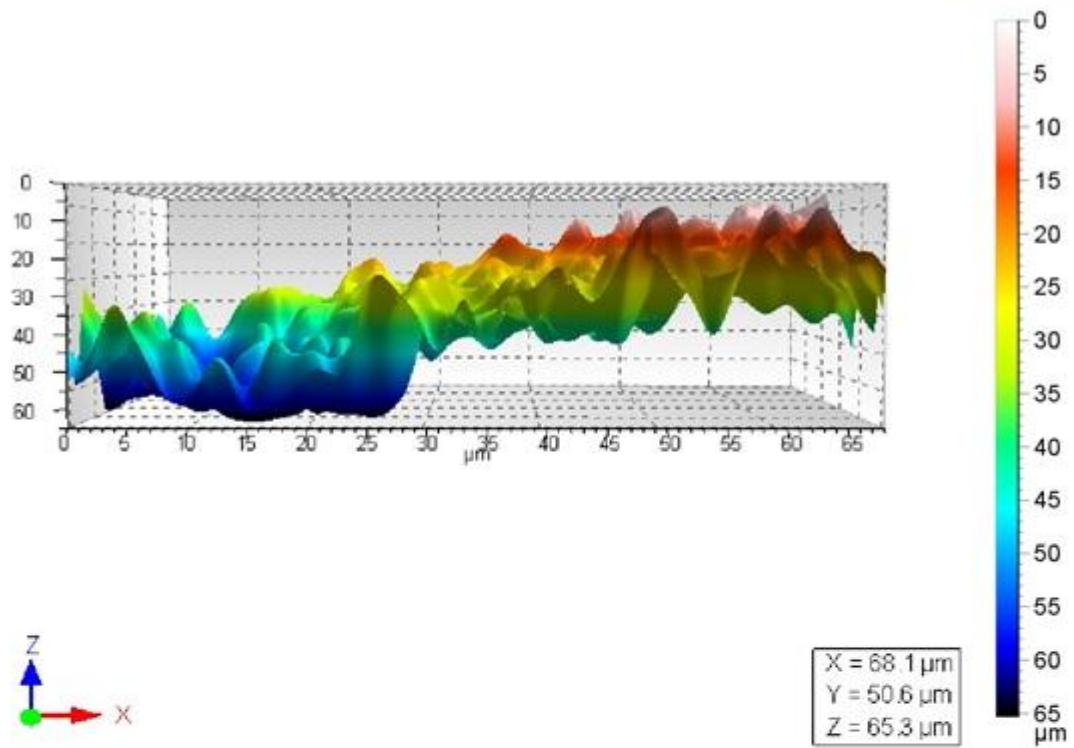




## Anexo 11. Mapeo topográfico probeta número 12.







Cursor 1  
 $X = 14.4 \mu\text{m}$   
 $Y = 43.7 \mu\text{m}$   
 $Z = 65.2 \mu\text{m}$

Cursor 2  
 $X = 61.6 \mu\text{m}$   
 $Y = 14.1 \mu\text{m}$   
 $Z = 2.97 \mu\text{m}$

Distancia horizontal:  $55.8 \mu\text{m}$   
 Variación en altura:  $62.2 \mu\text{m}$   
 Distancia oblicua:  $83.5 \mu\text{m}$

#### Parámetros de altura

<b>Sq</b>	15.9	$\mu\text{m}$	Altura media cuadrática de la superficie
<b>Ssk</b>	-0.248		Distorsión de la superficie
<b>Sku</b>	2.04		Kurtosis de la superficie
<b>Sp</b>	34.9	$\mu\text{m}$	Altura de pico máxima de la superficie
<b>Sv</b>	30.4	$\mu\text{m}$	Altura de valle máxima de la superficie
<b>Sz</b>	65.3	$\mu\text{m}$	Altura máxima de la superficie
<b>Sa</b>	13.3	$\mu\text{m}$	Altura media aritmética de la superficie